



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE**

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**TECHNOLOGIE VÝROBY PLASTOVÉHO  
STÍNÍTKA LAMPIČKY**

PRODUCTION TECHNOLOGY OF PLASTIC LAMP SHADE

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Bc. Tomáš Čajan

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

Ing. Bohumil Kandus

BRNO 2016

# Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie  
Student: **Bc. Tomáš Čajan**  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Strojírenská technologie  
Vedoucí práce: **Ing. Bohumil Kandus**  
Akademický rok: 2015/16

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## Technologie výroby plastového stínítka lampičky

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Na základě zadaného tvaru plastového dílce vypracovat rešerši na technologii vstřikování plastů do forem, provést návrh technologického postupu a konstrukce vstřikovací formy včetně potřebných výpočtů.

### Cíle diplomové práce:

Cílem práce je komplexní návrh technologie výroby na úrovni technologického postupu a konstrukční výkresové dokumentace nástroje na stínítka elektrické lampičky z plastu podložený kontrolními výpočty a doplněný technicko-ekonomickým zhodnocením.

### Seznam literatury:

Štěpek, J., Zelinger, J. a Kuta, A. (1989): Technologie zpracování a vlastnosti plastů. SNTL,

Praha. Sova, M. a Krebs, J. (2001): Termoplasty v praxi. Verlag Dashöfer, Praha.

Zeman, L. (2009): Vstřikování plastů. Nakladatelství BEN, Praha.

Menges, G. and Moučen, P. (1993): How to Make Injection Molds. Carl Hanser Verlag, München.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

-----  
prof. Ing. Miroslav Piška, CSc.  
ředitel ústavu .

-----  
doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

ČAJAN Tomáš: Technologie výroby plastového stínítka lampičky.

---

Tato diplomová práce se zabývá návrhem technologie vstřikování plastového dílce stínítka lampičky z polykarbonátu značeného Lexan 925 do vstřikovací formy horkou vtokovou soustavou. Nejprve je předložena literární studie zaměřená na plasty a technologii vstřikování do forem. Následuje řešení problému výroby stínítka lampičky. Navržená forma je dvojnásobná, dvou-desková, obsahuje dvě horké trysky a je vybavena zařízením pro vytáčení závitů. Práce obsahuje část výkresové dokumentace vstřikovací formy a seznam položek. Je doplněna technicko ekonomickým zhodnocením výroby.

Klíčová slova: stínítko, lampa, plast, vstřikování, vstřikovací forma.

## ABSTRACT

ČAJAN Tomáš: Production technology of plastic lamp shade.

---

This master thesis deals with design of injection molding technology for plastic lamp shade made of polycarbonate labelled Lexan 925. The injection is performed into injection mold with hot runner system. Initially there is a general study related to plastic materials and injection molding technology. Further the study continues with technological solution of production of the lamp shade. The designed injection mold is two-plate, double cavity mold with two hot nozzles and is equipped with a thread-unscrewing machine. This thesis contains part of the documentation and item list of the injection mold, along with technical-economical evaluation of the developed solution.

Keywords: shade, lamp, plastic, injection molding, injection mold.

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ČAJAN, Tomáš. *Technologie výroby plastového stínítka lampičky*. Brno, 2016. 66 s, 4 výkresy, 4 přílohy, CD. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie tváření kovů a plastů. Vedoucí práce Ing. Bohumil Kandus.

## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem předkládanou diplomovou práci na téma Technologie výroby plastového stínítka lampičky vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího diplomové práce.

V Brně dne 27. 5. 2016

-----  
Bc. Tomáš Čajan

## PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu Ing. Bohumilu Kandusovi za cenné připomínky a rady týkající se zpracování diplomové práce.

Dále bych rád poděkoval své rodině a přítelkyni za podporu po celou dobu studia a během tvorby této práce.

## OBSAH

### ABSTRAKT

### BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

### ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

### PODĚKOVÁNÍ

### OBSAH

### ÚVOD

1	Rozbor zadání.....	10
1.1	Varianty řešení .....	11
2	Technologie vstřikování plastů.....	12
2.1	Materiály pro technologii vstřikování plastů .....	12
2.1.1	Příprava plastových materiálů.....	12
2.1.2	Molekulární struktura plastů .....	13
2.1.3	Makromolekulární struktura plastů .....	14
2.1.4	Termodynamické vlastnosti plastových materiálů.....	16
2.1.5	Mechanické vlastnosti plastových materiálů .....	19
2.1.6	Navlhavost plastů .....	22
2.1.7	Elektrické vlastnosti plastů .....	23
2.1.8	Viskoelastické vlastnosti plastů .....	24
2.1.9	Reologie plastů .....	25
2.1.10	Přísady pro plasty .....	26
2.2	Princip technologie vstřikování plastů .....	27
2.2.1	Přípravné zpracování plastů .....	27
2.2.2	Vstřikovací cyklus.....	30
2.2.3	Průvodní jevy procesu vstřikování .....	34
2.2.4	Aplikace vstřikovacího procesu .....	37
2.3	Vstřikovací forma .....	38
2.3.1	Materiál vstřikovací formy a její výroba .....	39
2.3.2	Vtokové systémy forem .....	40
2.3.3	Temperační systém formy .....	43
2.3.4	Vyhazovací systém formy .....	45
2.3.5	Odvzdušnění formy .....	46
2.4	Stroje pro vstřikování plastů .....	46
3	Návrh řešení .....	48
3.1	Volba Materiálu.....	49
3.2	Technologické výpočty vstřikovacích parametrů .....	50
3.3	Násobnost formy .....	52

3.4	Návrh polohy dělicí roviny, vtoku a typu vtokového systému .....	53
3.5	Konstrukční řešení formy .....	57
3.6	Volba stroje .....	62
3.7	Technologický postup .....	63
4	Technicko ekonomické zhodnocení .....	64
4.1	Stanovení ceny výrobku .....	64
4.2	Doba splnění dodávky .....	65
5	Závěry .....	66
Seznam použitých zdrojů		
Seznam použitých symbolů a zkratk		
Seznam obrázků		
Seznam tabulek		
Seznam příloh		
Seznam výkresové dokumentace		
Přílohy		



## ÚVOD

Technologie vstřikování plastů je progresivním směrem strojírenské výroby, který prochází v posledních desetiletích dynamickým rozvojem, především kvůli stále se zvyšujícím nárokům na kvalitu v automobilovém a elektrotechnickém průmyslu, nebo medicínským aplikacím. Spočívá ve vstříknutí polymerní taveniny do kovové formy, ve které po ztuhnutí vzniká hotová součást. Jedná se o velmi přesný, a plně automatizovaný proces, který se vyznačuje vysokou produktivitou práce a nízkými výrobními časy. Plasty postupně nahrazují klasické kovové konstrukční materiály ve stále více odvětvích strojírenské výroby, především díky jejich specifickým vlastnostem, mezi které patří například nižší měrná hmotnost v porovnání s ostatními strojírenskými materiály, nízká teplota tavení, odolnost proti korozi, dobré elektroizolační vlastnosti a v neposlední řadě také ve většině případů nízká cena. Polymerní materiály se vyznačují vysokou mírou recyklovatelnosti (u termoplastů), čímž přispívají k ekologičnosti výrobního procesu.

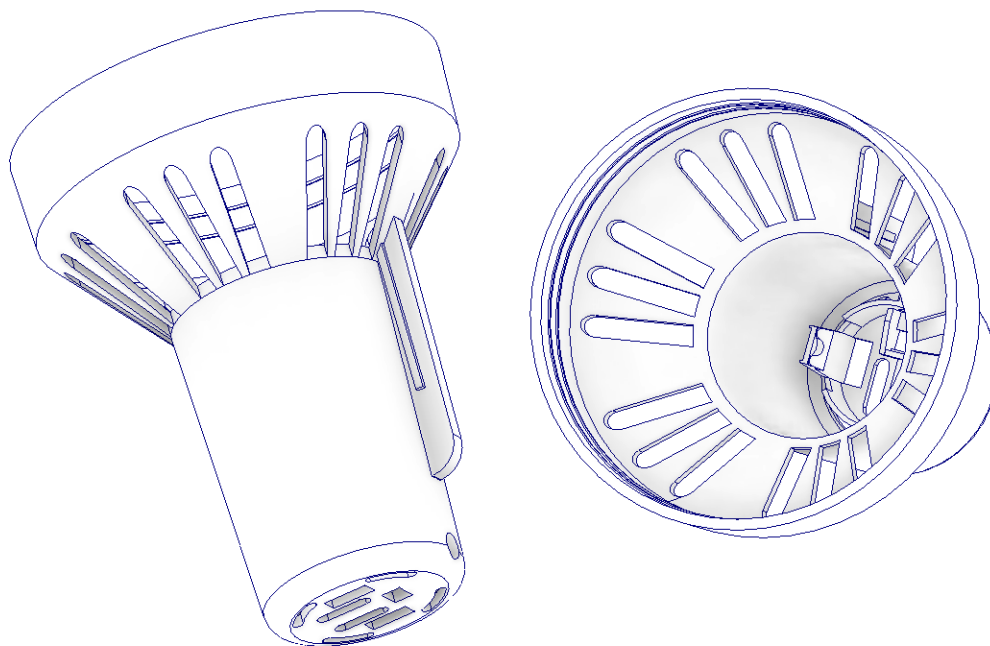
Oblasti využití dílů zhotovených technologií vstřikování plastů (obr. 1) zahrnují například automobilový průmysl, kde se úspora hmotnosti spojená s plastovými díly projeví ve snížení spotřeby paliva, a tím i snížením vyprodukovaných emisí. I v leteckém průmyslu pomáhají plasty snižovat hmotnost a spotřebu paliva při zachování vynikajících mechanických vlastností. Například Boeing 787 je z téměř 50% vyroben z plastů vyztužených uhlíkovými vlákny, což znamená až 20% snížení hmotnosti letadla. Elektroizolační vlastnosti plastů z nich dále dělají ideální materiály pro využití v elektrotechnickém průmyslu, kde z nich jsou vyráběny kryty a části rozmanitých druhů elektronických zařízení, například i stolních lampiček. Celý proces vstřikování plastů by byl nemyslitelný bez kvalitní CAM/CAD podpory a simulace procesu, která dokáže odhalit skryté nedostatky a pomáhá optimalizovat proces z technologického i ekonomického hlediska.



Obr. 1 Příklady produktů technologie vstřikování plastů [3],[10],[11],[38]

## 1 ROZBOR ZADÁNÍ

Zadaným dílcem je stínítko lampičky, plastová součást o výšce 100 mm, největším průměru 80 mm, nejmenším průměru 30 mm a tloušťce stěny 2 mm. Součást je vyrobena technologií vstřikování termoplastu do kovové formy. Jelikož materiál není specifikován zadáním, bude zvolen v kapitole zabývající se návrhem řešení. Na obr.2 je zobrazen model součásti, vytvořený v CAD systému Autodesk Inventor 2016, na základě předlohy reálného stínítka lampičky, získaného jako součást zadání práce. Kompletní výkresová dokumentace je obsažena v příloze 1.



Obr.2 3D model zadaného tělesa stínítka lampičky

Z modelu je patrné, že se jedná o tenkostěnnou rotační součást, obsahující několik technologických prvků, zajišťujících funkci, které budou nyní rozebrány.

- Dva „zobáčky“ na dně součásti a jejich vyztužení, které slouží pro uchycení objímky pro žárovku lampičky. Rádiusové vybrání v horní části zobáčků je navrženo z důvodu pohodlné technické manipulace při vyjímání objímky ze stínítka např. šroubovákem. Zobáčky musí být schopny pružné deformace zajišťující uchycení a vyjmutí objímky žárovky.
- Skupina 6 otvorů na dně součásti, které mají funkci odvodu tepla vzniklého svícením žárovky z prostoru stínítka a zabraňují tak tepelné degradaci plastu. Čtyři z nich mají tvar oblouku, jelikož je možno předpokládat, že lampička bude během své životnosti natočena šikmým směrem a geometrie těchto otvorů se jeví jako ideální řešení odvodu tepla.
- Dva obdélníkové otvory technologického charakteru, pro zjednodušení zaformování spodní části „zobáčků“.
- Obdélníkový otvor, kterým je veden přívod elektrické energie
- Vnitřní závit M5 sloužící pro uchycení stínítka na nosném rameni lampičky.
- Celkem 18 radiálně umístěných otvorů ve skupinkách po 3, které zajišťují dostatečnou tepelnou cirkulaci a dodatečný odvod tepla z prostoru stínítka.
- Dva vnitřní obvodové zápichy, sloužící k zachycení výstřiku na tvárníku při odformování.

Součást neobsahuje žádné délkové funkční rozměry, jejichž přesnost by bylo nutné bezpodmínečně dodržet. Obsahuje však požadavek na zrcadlový lesk ploch vnitřního povrchu

součásti počínaje vnitřní válcovou plochou, přes šikmou rotační plochu obsahující 18 otvorů až po válcovou plochu obsahující zápichy.

## 1.1 Varianty řešení

Pro tuto součást neexistuje velké množství použitelných výrobních technologií, mimo vstřikování plastů. Tradičně je jako alternativa vstřikování uváděno lisování plastů pomocí postupového nástroje, tedy pomocí ohybových a střížných operací. To je ovšem vzhledem ke geometrii stínítka nemyslitelné. Na výběr zbývá pouze technologie vstřikování plastů, kterou můžeme dále rozlišit podle vstřikovaného materiálu na vstřikování reaktoplastů, nebo termoplastů. Další rozhodování pak probíhá ve volbě dvou deskové, nebo tří deskové formy pro vstřikování. Nyní budou stručně uvedeny možné výrobní varianty, seřazené od nejméně vhodné po nejvhodnější a zároveň zvolenou metodu výroby.

1. Varianta – výroba pomocí vstřikování reaktoplastů. Hlavním nedostatkem této metody je základní vlastnost reaktoplastů – vysoká tvrdost a křehkost, což by znemožňovalo funkci zobáčků, které musí být schopné elastické deformace pro správnou funkci uchycení objímky žárovky. Výrobní řešení vstřikováním reaktoplastů by tedy bylo založeno na změně geometrie části stínítka, která má funkci uchycení objímky. Musela by být navržena geometrie, jejíž funkce nepočítá s pružnou deformací, což by mohlo být realizováno např. pomocí závitu držícího objímku. Je tedy patrné, že je součást navržena přímo pro potřeby vstřikování termoplastů a řešení pomocí vstřikování reaktoplastů je zamítnuto.
2. Varianta – tří desková forma pro vstřikování termoplastů. Jedná se o produktivní metodu, která ovšem musela být zamítnuta z důvodu rozhodnutí použít ve formě horký vtokový systém, což při návrhu tří deskové formy není technologicky možné.
3. Varianta – dvou desková forma pro vstřikování termoplastů je zvoleným řešením výroby stínítka, jelikož vše nasvědčuje tomu, že původní návrh stínítka vycházel právě ze předpokladu výroby tímto způsobem, pro který je geometrie stínítka optimálně uzpůsobena. Jakákoli jiná metoda výroby by znamenala nutnost velmi rozsáhlých úprav jeho geometrie, ze kterých by vzešla součást s velmi odlišnou geometrií ve srovnání se zadaným tělesem stínítka.

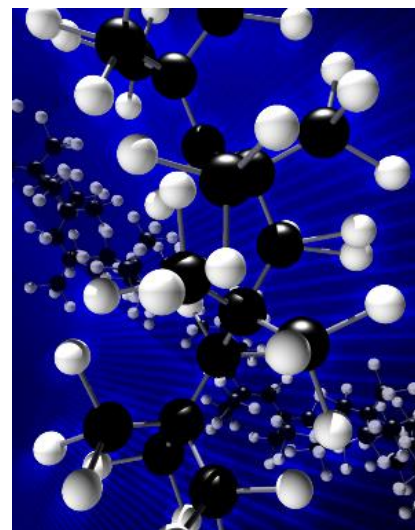
## 2 TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ PLASTŮ

Tato kapitola pojednává o technologii vstřikování plastů, progresivní metodě zpracování plastových materiálů, která vyniká vysokou přesností a produktivitou výroby. Nejprve jsou podrobně rozebrány používané materiály, od jejich vzniku, přes strukturu a její uspořádání, až po rozličné fyzikální a chemické vlastnosti těchto materiálů. Následuje sekce o principu a průběhu vstřikování, popisující celý proces od přípravy, přes jednotlivé dílčí části vstřikovacího cyklu, až po jeho průvodní jevy a praktické aplikace. Dále kapitola pojednává konkrétně o náležitostech vstřikovacích forem – o jejich dílčích částech a jejich funkci. Závěrem se kapitola zabývá stroji vhodnými pro tuto technologii.

### 2.1 Materiály pro technologii vstřikování plastů

#### 2.1.1 Příprava plastových materiálů [14],[36],[37]

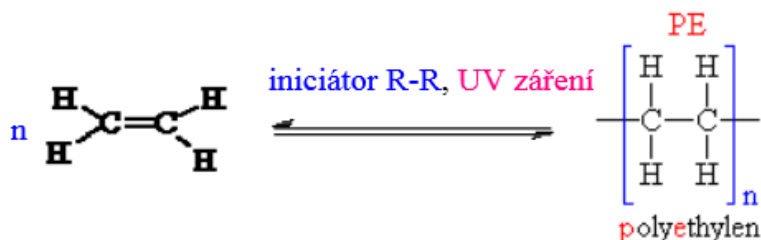
Polymerní materiály neboli plasty, jsou základní materiály využívané technologií vstřikování plastů. Skládají se z polymerů, což jsou organické látky tvořené dlouhými makromolekulárními řetězci, a z plniv (aditiv), které ovlivňují vlastnosti výsledného materiálu. Polymery jsou synteticky připravované makromolekulární látky o molekulové hmotnosti vyšší než  $10^4$ , tvořené opakujícími se jednoduššími stavebními prvky zvanými monomery, a jsou dobře tvařitelné teplem a tlakem. Základními prvky řetězce jsou atomy uhlíku, které mají schopnost vzájemně se vázat a vytvářet tak dlouhé řetězce. Na základní řetězec tvořený uhlíkem se pak váží další atomy např. uhlíku, vodíku, dusíku, a chloru. Počet monomerních jednotek v polymeru se nazývá polymerační stupeň  $n_p$ , který nabývá hodnot  $10^3$  až  $10^5$ . Sloučeniny s vyšším polymeračním stupněm nazýváme polymery, s nižším stupněm oligomery. Ilustrační příklad struktury polymeru je zobrazen na obr. 3.



Obr. 3 3D Model Polyisobutylenu [17]

Polymery vznikají polyreakcemi - chemickými reakcemi, které se mnohokrát opakují. Polyreakce je možná pouze u sloučenin majících minimálně dvě dvojné vazby a pro zahájení reakce je nutné dvojnou vazbu rozštěpit (iniciovat) například působením tepla. Existují tři druhy polyreakcí.

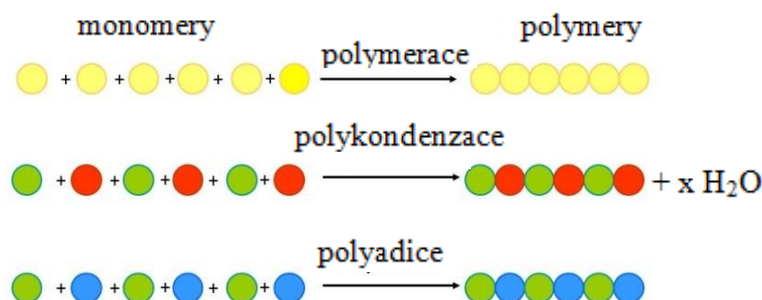
- **Polymerace** je nejčastěji používaná polyreakce, vyznačující se vysokou rychlostí (řádově několik vteřin). Monomerní jednotky se při ní spojují přímo do podoby makromolekuly a nevzniká žádný vedlejší produkt. Skládá se ze tří částí – iniciace (pomocí UV záření), při které dojde k rozštěpení dvojné vazby a vzniká tzv. radikál (útvár se dvěma volnými elektrony). Dále fáze propagace, exotermická reakce při níž vzniklý radikál reaguje s další molekulou monomeru a dochází k růstu makromolekulárního řetězce. Volný elektron se stále obnovuje na konci řetězce. Závěrem je terminace, při které dochází k ukončení růstu řetězce a obnovení dvojné vazby. Při polymeraci nevzniká žádný vedlejší produkt. Příkladem je vznik PVC, PE, PP. Celý proces je schematicky zobrazen na obr.4.



Obr.4 Znázornění průběhu polymerace [39]

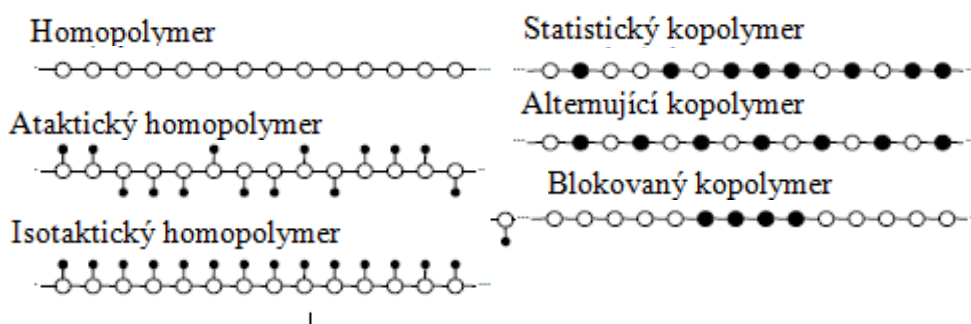


- **Polykondenzace** - chemické slučování různých druhů monomerů, při kterých vzniká vedlejší produkt (např. voda, alkohol, amoniak). Na rozdíl od polymerace, kde má vzniklý polymer složení totožné s původním monomerem, má při polykondenzaci jiné složení, jedná se také o výrazně pomalejší reakci. Je využívána např. pro přípravu PA, PU a epoxidů.
- **Polyadice** - chemická reakce spojování monomerů pomocí adičních reakcí, místo vzájemného spojování (řetězení), jako je tomu u výše uvedených reakcí, za předpokladu, že mají molekuly sloučenin alespoň dvě násobné vazby nezbytné pro adiční reakci. Struktura základního článku polymeru se při polyadici odlišuje od struktury výchozí látky. Používá se pro přípravu PUR a epoxidových pryskyřic. Srovnání principů jednotlivých polyreakcí je schematicky znázorněno na obr. 5.



Obr. 5 Schematické znázornění rozdílu mezi polyreakcemi [40]

V závislosti na uspořádání monomerů produktu polyreakce dále rozlišujeme pojmy homopolymer a kopolymer. Jako homopolymer (např. PE, PVC) je označován polymer, jehož makromolekuly jsou složeny z monomerů chemicky stejného typu. Kopolymery (např. ABS, reaktoplasty) jsou pak tvořeny chemicky rozdílnými monomerními jednotkami, řazenými v řetězci pravidelným, nebo náhodným způsobem. Nejčastější typy uspořádání monomerů jsou znázorněny na obr. 2.4. Konfigurace řetězce, neboli takticita, pak popisuje způsob uložení bočních skupin atomů kolem zákl. řetězce. Isotaktické uspořádání znamená uložení bočních skupin po jedné straně řetězce, zatímco ataktické uspořádání je ukládá nahodile.

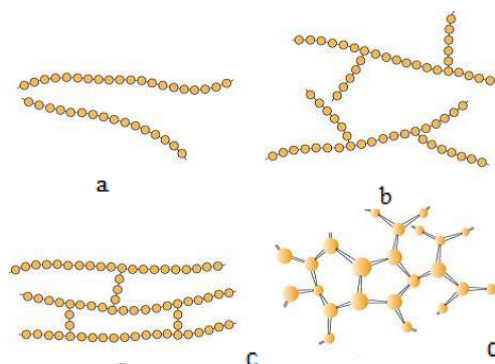


Obr. 6 Princip uspořádání struktury polymerů [27]

### 2.1.2 Molekulární struktura plastů [22],[40],[36],[33],[22]

Podle tvaru makromolekul, jenž má zásadní vliv na fyzikálně chemické chování polymerního materiálu, rozlišujeme tři základní typy struktury polymerů.

- **Lineární makromolekuly** - seřazení jednotlivých monomerů do řad za sebou (obr.7a), do tvaru jednoduchého řetězce, kde mezi jednotlivými monomery působí slabé Van der Waalsovy vazby. Lineární makromolekuly mají možnost se přiblížit



Obr. 7 Rozdělení molekulární struktury [21]

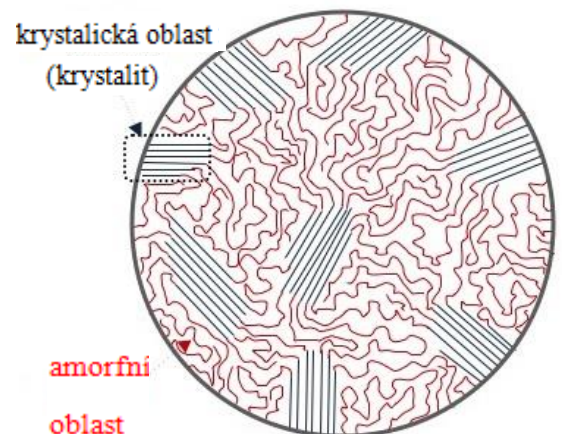
a efektivněji tak vyplnit prostor, což vede k vysoké hustotě, snáze také vytváří pravidelné shluky krystalických struktur. Mezi jejich charakteristické vlastnosti patří dobrá rozpustnost, tavitelnost, viskozita ve formě a houževnatost v tuhém stavu, což značí dobrou zpracovatelnost taveniny. Lineární makromolekuly jsou typické pro PE, PVC.

- **Rozvětvené makromolekuly** - podobně jako u lineárních makromolekul se monomery skládají vedle sebe (obr.7b), ale kvůli bočním větvím, které vychází ze základního řetězce makromolekul, se nemohou dostatečně přiblížit, což vede k nižší hustotě než u lineární struktury a nižšímu stupni krystalinity. Rozvětvenost má negativní vliv na pohyblivost makromolekul a tím pádem snižuje viskózní vlastnosti taveniny ve formě. Krajní řetězce, které způsobují oddálení makromolekul, mají za následek snížení většiny mechanických vlastností, kvůli poklesu mezimolekulárních sil. Patří sem např. nízkohustotní polyetylen.
- **Zesíťené makromolekuly** - vznikají propojením lineárních, nebo rozvětvených makromolekul pomocí příčných vazeb (obr.7c), čímž vzniká prostorová síť, která znemožňuje opakované tavení polymeru. To je vyváжено vyšší odolností vůči teplotě a vysokou tvrdostí. Mají však velmi nízkou odolnost vůči namáhání rázem. Typickým příkladem zesíťené struktury jsou vulkanizované kaučuky, elastomery a reaktoplasty (obr.7d).

### 2.1.3 Makromolekulární struktura plastů [14],[36],[33],[15],[25],[27] ,[20]

Makromolekulární struktura popisuje stupeň uspořádanosti molekul v prostoru, který může být buď náhodný, nebo částečně pravidelný, ve výjimečných případech je možné dosáhnout téměř pravidelného uspořádání. Obecně tato struktura vzniká při krystalizaci – tunutí taveniny plastu. Krystalizaci dělíme na primární, při tunutí taveniny a sekundární, která pokračuje v tuhém stavu v řádu i několika měsíců a nepříznivě ovlivňuje strukturu, mechanické vlastnosti a rozměry výsledného dílce. V rámci makromolekulární struktury rozlišujeme amorfni a krystalické uspořádání, doplněné reaktoplasty, viz obr.8.

- **Amorfni** struktura je charakteristická chaotickým, zcela nahodilým uspořádáním makromolekul ve formě „klubek“ (globul) o velikosti 10-30 nm a je typická zejména pro termoplasty, jako například PS, PC, PMMA. Jednotlivé globuly vůči sobě mohou být uspořádány do pravidelných útvarů, ale každá globula si přesto zachovává individuální charakter. Jedná se tedy o energeticky nejvýhodnější makromolekulární útvar. Mezi jejich hlavní vlastnosti patří vysoká tvrdost, pevnost, křehkost a průhlednost díky nízkému indexu lomu (1,4 až 1,6). Jsou také odolné proti tečení za studena (creepu), vyznačují se vysokou houževnatostí a malým smrštěním (méně než 1%), což z nich dělá ideální materiál pro velmi přesné výstřiky. Součinitel teplotní roztažnosti amorfni polymerů je nižší ve srovnání se semikrystalickými polymery. Vlastnosti plastů jsou obecně závislé na teplotě, se kterou se skokově mění. Použitelnost amorfni plastů se pohybuje do teploty zesílnění  $T_g$ . Z celkového množství vyráběných amorfni termoplastů je jich pro technologii vstřikování určeno zhruba 20%. Využívají se především v automobilovém průmyslu pro osvětlovací techniku díky své transparentnosti.
- **Krystalická** (semikrystalická) struktura obsahuje kombinaci dlouhých řetězců uspořádaných do pravidelných struktur a amorfni části (obr. 2.7). Struktura vykazuje určitý stupeň uspořádanosti makromolekul označovaný jako stupeň krystalinity a pohybuje se od 35 do 90%, což vyjadřuje relativní podíl uspořádaných oblastí vůči amorfni oblastem. Tepelné a mechanické vlastnosti semikrystalu jsou závislé na stupni krystalinity. Z důvodu, že není technicky možné dosáhnout 100% krystalinity, hovoříme o semikrystalických



Obr. 8 Amorfni a krystalické oblasti [6]

materiálech. Ve srovnání s amorfními plasty dosahují většího smrštění řádově od 1 do 2,5%. Po vizuální stránce jsou to mléčné, zakalené materiály, např. PP, PA, PE, POM. Jsou charakteristické vyšším indexem lomu světla, než u amorfni struktury, vysokou houževnatostí a modulem pružnosti rostoucím se stupněm krystalinity, který je možné vypočítat ze vztahu 2.1.

$$X = \frac{\rho - \rho_a}{\rho_c - \rho_a}, \quad (2.1)$$

kde: X – krystalinita [-]

$\rho$  – celková hustota polymeru [ $\text{g/cm}^3$ ]

$\rho_c$  – hustota krystalické složky polymeru [ $\text{g/cm}^3$ ]

$\rho_a$  – hustota amorfni složky polymeru [ $\text{g/cm}^3$ ]

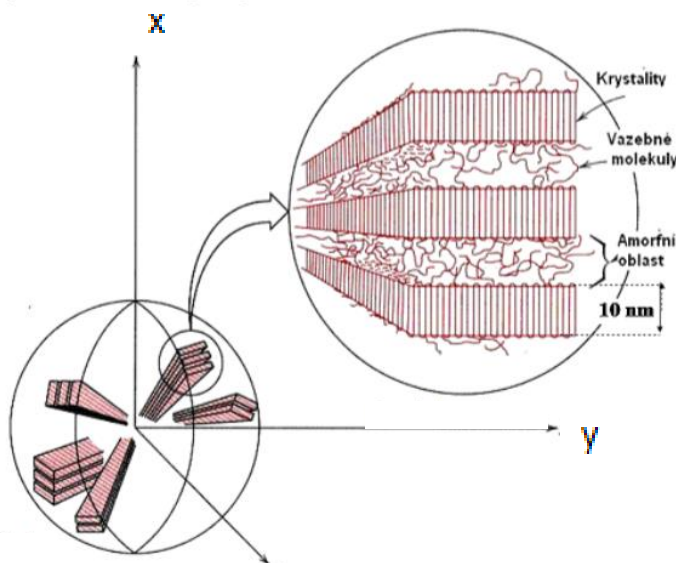
Použitelnost semikrystalických polymerů se pohybuje do teploty tání  $T_m$ . Krystalické oblasti v polymerech jsou označovány jako krystality, aby se zdůraznilo, že nejde o dokonalé krystaly. Dále rozlišujeme několik základních morfologických útvarů, které můžeme v rámci semikrystalických polymerů nalézt, což jsou lamely, sférolity, fibrily, a struktura typu „shish-kebab“.

- **Lamely** - jedná se o morfologické útvary (obr.9) o velmi vysokém stupni krystalinity, který se blíží monokrystalu. Jejich laboratorní příprava je náročná a probíhá pomalou krystalizací z roztoku taveniny, jejich význam v praxi je tedy nízký. Je to trojrozměrný destičkovitý útvar složený z makromolekulárních řetězců uložených kolmo k tloušťce destičky. Dosahuje rozměrů 10-15 nm tloušťky a zhruba 1  $\mu\text{m}$  šířky.



Obr. 9 Znárodnění lamely [15]

- **Sférolity** - jde o shluky lamel vznikající při tuhnutí (krystalizaci) tavenin polymerů, které vycházejí ze společného centra, zárodku sférolitu a vrtulově stočené se rozrůstají do všech stran. Typická sférolitická struktura je zobrazena na obr. 2.9. Pro vznik semikrystalické struktury je obecně nutná tvorba krystalizačních zárodků (nukleace), na nichž krystality vyrostou. Pro dosažení co nejlepších mechanických vlastností musí být dosaženo co nejvyššího stupně krystalinity a zároveň jemnozrnné struktury, která



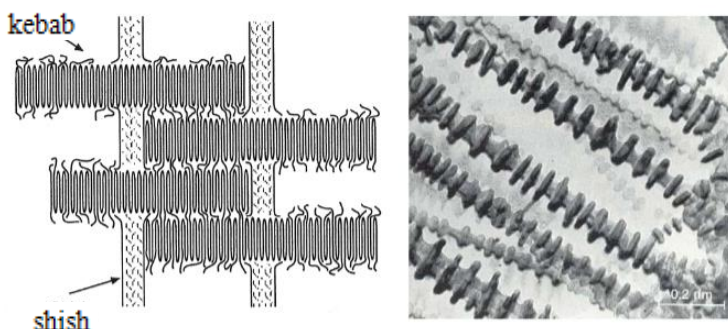
Obr. 10 Sférolitická struktura [40]

závisí především na teplotě vzniku krystalické fáze. Jejich velikost se pohybuje v rozmezí 0,1–1  $\mu\text{m}$ . Dokud se sférolity nedotknou, jedná se o kulovité útvary, po doteku se mezi nimi začnou tvořit hranice

a sférolity získávají tvar mnohostěnu, které jsou často slabými místy materiálu, jelikož je v těchto místech krystalizace ovlivněna zhoršenou přístupností krystalizující taveniny. Výrazný vliv na strukturu sférolitu má teplota během krystalizace. Pokud dojde ke krystalizaci během konstantní teploty, má srovnatelné vlastnosti ve všech směrech a hned

od počátku roste všemi směry rovnoměrně. Vzniká radiální kulový sférolit, jehož struktura bývá také označována jako „Maltézský kříž“. Naproti tomu zárodek sférolitu vzniklý za neizotermní teploty preferuje růst lamel ve směru své délky a větví se, dokud nedojde k jeho uzavření. Růst dále pokračuje rovnoměrně ve všech směrech a vzniká sférolit s „chomáčkovou“ strukturou, zvaný dendritický sférolit neboli dendrit. Obecně lze říct, že existuje hierarchická závislost lamela – sférolit – sférolitický struktura.

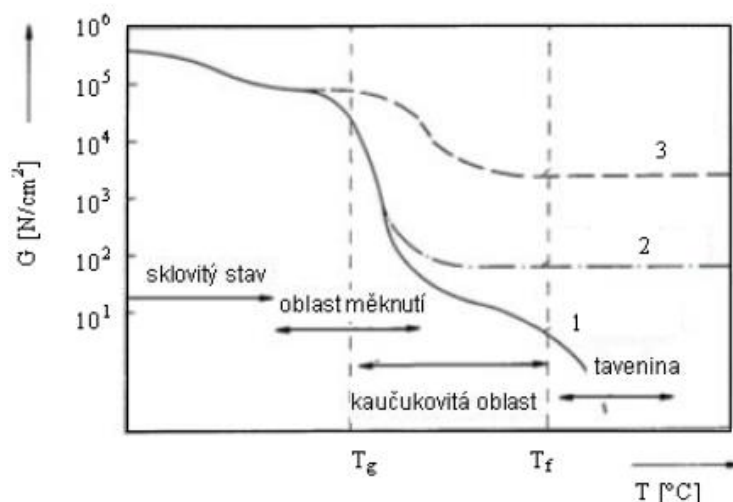
- **Fibrily** jsou vláknitým útvarům, který vzniká, pokud je roztok polymeru během krystalizace vystaven smykovému napětí, v praxi nejčastěji v podobě zpracování technologií zvlákňování. Ani lineární makromolekula se totiž nemůže vyskytovat ve zcela napřímeném stavu, kvůli vazebnému úhlu uhlíku ( $109^{\circ}28'$ ), proto je pro dosažení napřímení a paralelní orientace vláken užívaná technologie zvlákňování, jejímž principem je protlačování roztoku polymeru zvlákňovací tryskou do zvlákňovací šachty, kde za vysoké teploty dochází k odpaření použitého rozpouštědla. Základní strukturní jednotka vláken se nazývá mikrofibrila a je tvořena usměrněnými lamelami ze skládaných makromolekul, které jsou navzájem propojeny vazebnými molekulami. Směry os řetězců a mikrofibrily jsou přitom totožné. Samotné vlákno je pak tvořeno svazkem mikrofibril.
- **„Shish-kebab“** nazývaný také „ražničí“ je speciálním případem makromolekulární struktury plastů, který vzniká při tečení lineárních řetězců s krátkými bočními větvemi, jako je například PE a PP, nebo při smykovém působení během krystalizace taveniny. Skládá se z vláknitého jádra (shish), které obsahuje velké množství napřímených řetězců. Na něm jsou narostlé lamely (kebab), tvořené skládanými řetězci (obr.11).



Obr. 11 Struktura typu Shish-kebab [15]

#### 2.1.4 Termodynamické vlastnosti plastových materiálů [22], [4], [14], [36], [21], [22]

Vlastnosti plastů jsou závislé na teplotě, která může urychlovat, nebo přímo skokově měnit stav struktury polymerních materiálů. K tomu dochází při přechodových teplotách, zobrazených na obr.12. U tepelného namáhání plastů není rozhodující pouze výška teploty, ale také doba, po kterou je součástí vystavena jejímu působení. Tepelná vodivost plastů je obecně nižší než u kovových materiálů a v praxi znamená ve srovnání s kovy delší časy ohřevu i ochlazování. Je vyšší ve směru orientace makromolekul a nižší ve směru k ní kolmém. Teplotní roztažnost plastů je závislá na modulu



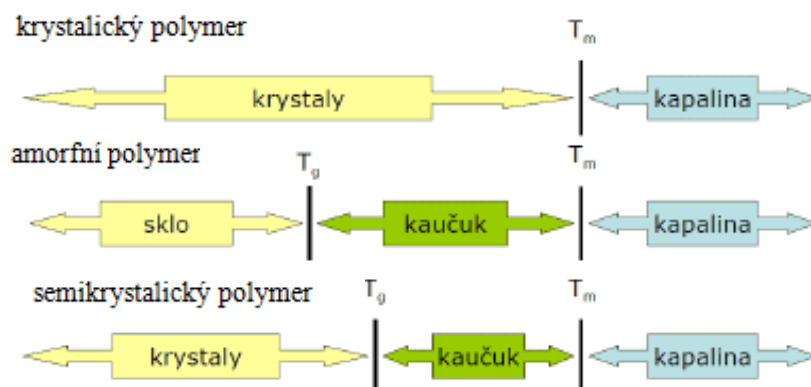
Obr.12 Přechodové teploty polymerů [14]



pružnosti, s jehož rostoucí hodnotou klesá. Rozsah teplot, které je materiál schopen vydržet bez degradace nebo poškození ovlivňují především makromolekulární struktura a typ použitého plniva.

- **Teplota skelného přechodu  $T_g$**  - pod touto teplotou se materiál nachází v tuhém, sklovitém stavu. Při přechodu přes tuto teplotu dochází ke skokové změně vlastností, je to teplota přechodu do kaučukovitého stavu.
- **Teplota viskózního toku  $T_f$**  – hraniční teplota pro amorfní termoplasty. Při jejím překročení dojde k přeměně polymeru ve viskózní kapalinu. Nad touto teplotou se nachází oblast zpracovatelnosti materiálu. Jejím zvýšením poklesnou mezimolekulární síly i viskozita kapaliny.
- **Teplota tání  $T_m$**  – hraniční teplota pro semikrystalické termoplasty nad kterou dochází k tání krystalů a změně tuhé fáze na taveninu.
- **Teplota tepelné degradace  $T_z$**  – teplota, nad kterou dochází k rozkladu materiálu.

Na obr.13 je znázorněno schéma přechodových teplot v závislosti na stavech struktury, ve kterých se polymerní materiál může nacházet. U semikrystalických materiálů je také možno určit teplotu skelného přechodu, jelikož obsahují i amorfní část struktury. Vliv změn při této teplotě ale není příliš patrný, pokud polymer dosahuje vysokého stupně krystalinity, jelikož změny pramenící z teploty  $T_g$  platí pouze pro amorfní složku.

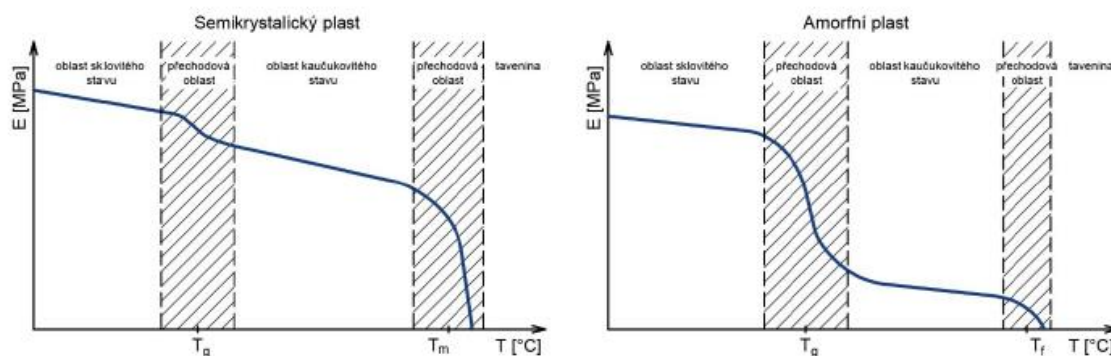


Obr. 13 Přechodové oblasti polymerů [30]

Z termodynamického hlediska je mezi semikrystalickými a amorfními plasty velký rozdíl, pro názornost je ilustrován závislostí modulu pružnosti na teplotě obou druhů plastů (obr. 2.15). U semikrystalických materiálů nastávají nejrychlejší změny vlastností v oblasti charakterizované teplotou tání  $T_m$ , při které dochází k rozpadu a tání krystalitů, což má za následek změnu fáze hmoty, která přechází z tuhého stavu do kapalného. K tání dochází v širším teplotním intervalu a teplota  $T_m$  představuje pouze jeho střední hodnotu, obdobně je tomu u teploty  $T_g$ . Je patrné, že oblast využitelnosti semikrystalických materiálů (do teploty  $T_m$ ) je širší, než oblast využitelnosti amorfních materiálů (do teploty  $T_g$ ).

Podle teplotního chování můžeme plasty obecně rozdělit do následujících kategorií:

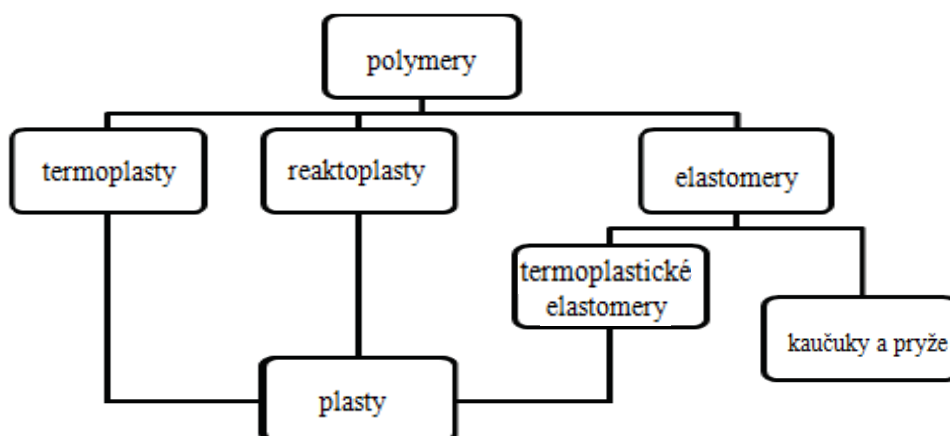
- **Termoplasty** - polymerní materiály tvořené dlouhými lineárními nebo mírně zesítěnými řetězci monomerů bez výrazného prostorového zesílení. Jsou charakteristické nízkou teplotou tání (cca 250 °C podle zvoleného materiálu), po jejímž překročení přechází do plastického stavu, stavu vysoce viskózních kapalin a jsou vhodné pro zpracování technologií vstřikování. Již při přiblížení se k hranici teploty tavení dochází k měknutí termoplastu. Proces jejich tavení je fyzikálním procesem, ne chemickým. Po ochlazení pod teplotu tání  $T_m$  přechází zpět do tuhého stavu (semikrystalické plasty), amorfní plasty tuhnou při teplotě viskózního toku  $T_f$ . Mohou být recyklovány a opět zpracovávány teoreticky bez omezení, jelikož při něm nedochází ke změně chemické struktury. Termoplasty jsou pro průmyslové



Obr. 14 Závislost modulu pružnosti polymerů na teplotě [30]

použití dodávány ve formě prášků, granulí, bloků, vláken a profilů. Mezi nejznámější termoplasty patří PE, PP, PS, PC, PVC.

- Reaktoplasty** (termosety) jsou materiály, které stejně jako termoplasty v první fázi zahřívání na teplotu blízkou teplotě tavení měknou a jsou tvaritelné, ale pouze po omezenou dobu. Dalším zvyšováním teploty dochází k chemické reakci vytvrzování, exotermické reakci, při které reaktoplast získává zesíťnou strukturu. Plastový dílec je potom možné považovat za jednu velkou makromolekulu. Ochlazování probíhá mimo nástroj, protože by bylo technologicky velice obtížné zajistit rychlý ohřev formy pro vytvrzení a následné rychlé ochlazení. Jedná se o nevratný děj, vytvrzené plasty nelze znovu přivést do plastického stavu, protože by došlo k jejich degradaci (shoření). Reaktoplasty jsou v technologii vstřikování plastů využívány mnohem méně než termoplasty, především kvůli jejich nízké vrubové houževnatosti. Je pro ně charakteristická vyšší tvrdost, pevnost a tepelná stálost než u termoplastů, což je vyváжено horšími tažnými vlastnostmi. Při tahové zkoušce vykazují podobné chování, jako keramika. Jsou využívány především v elektrotechnickém průmyslu jako elektricky izolační součásti. Patří mezi ně fenolové pryskyřice, polyesterové hmoty, epoxidové pryskyřice.
- Elastomery** jsou syntetické materiály charakteristické velmi dobrými elastickými vlastnostmi. Vyznačují se tím, že je lze za běžných podmínek výrazně deformovat malou silou bez toho, že by došlo k jejich porušení. Při zahřívání měknou a na omezenou dobu přechází do plastického stavu, při dalším ohřevu dojde k tzv. vulkanizaci – chemické reakci, při níž dochází k prostorovému zesíťování struktury. Při reakci je zároveň kaučuk, základní surovina, přeměněn na tvárnou pryž, která je zdrojem výrazných elastických vlastností elastomeru. U elastomerů založených na struktuře termoplastů nedochází během vulkanizace k chemickým změnám struktury a proces je opakovatelný. Od výše uvedených materiálu se liší převážně tím, že jejich elasticita není závislá na teplotě. Mezi elastomery patří například silikony a kaučuky.

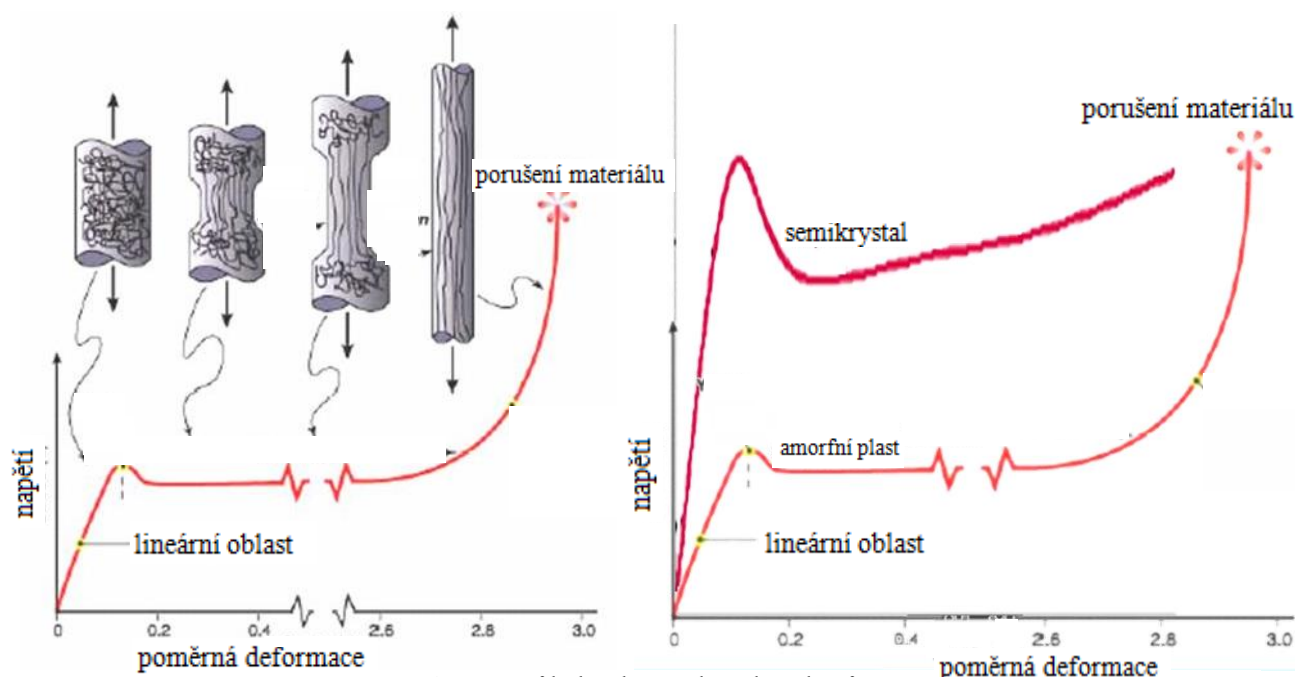


Obr. 15 Všeobecné rozdělení plastů [26]

### 2.1.5 Mechanické vlastnosti plastových materiálů [40], [4],[15], [17],[20]

Mechanické vlastnosti plastů můžeme rozdělit v rámci typů zkoušek, pomocí kterých jsou zjišťovány. Rozlišujeme krátkodobé zkoušky, u kterých se vliv relaxačních dějů považuje za zanedbatelný a stanovení hledaných parametrů proběhne během několika minut. Patří sem tahová zkouška a zkouška tvrdosti. Druhým typem jsou dlouhodobé zkoušky, které se podle charakteru zatěžující síly rozdělují na statické (creepové deformační zkoušky a relaxace napětí) a dynamické (cyklické zkoušky, rázová a vrubová houževnatost).

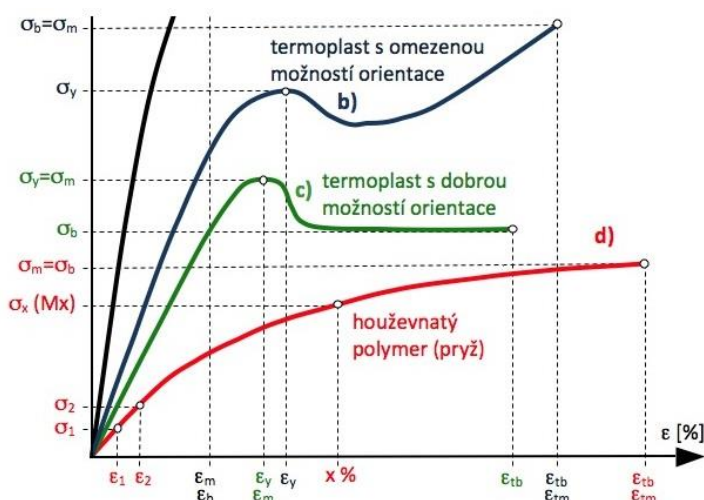
- **Tahová zkouška** zprostředkovává především údaje o mezi kluzu, mezi pevnosti, tažnosti a prodloužení materiálu. Na zkušební těleso při ní působí stále se zvětšující zatěžující síla až do okamžiku, kdy dojde k porušení zkoušeného dílce. Vzorky mají většinou tvar oboustranné lopatky, tzv. osmičky. V průběhu zkoušky je zaznamenávána působící síla v závislosti na prodloužení zatěžovaného tělesa. Polymery se při tahové zkoušce chovají výrazně odlišně od kovových materiálů, jsou při ní závislé především na teplotě a rychlosti zatěžování. Při statickém zatěžování dojde k rozplétání polymerních řetězců (obr. 16a), což je bezproblémový proces, pokud probíhá v rámci kvazistatické deformace. Pokud zatěžování probíhá za nízkých teplot, nebo vysoké rychlosti a není čas pro rozpletení řetězců, klesá maximální poměrná deformace a roste mez pevnosti. Na obr. 2.15b je zobrazeno srovnání obecných průběhů tahové zkoušky pro amorfni a semikrystalické materiály. Průběh napětí amorfniho materiálu je charakteristický elastickou oblastí na začátku zkoušky, následuje pokles napětí spojený s formováním krčku zkušební tělesa, dále natahování krčku a nakonec zvýšení napětí vlivem vytvrzování polymerního řetězce a porušení materiálu. Během natahování krčku dochází k téměř paralelní orientaci polohy polymerních řetězců v tělese, což je jeden z důvodů, proč je třeba vyšší napětí pro porušení tělesa. Průběh tahové zkoušky u semikrystalického materiálu se od amorfniho liší pouze tím, že při něm nedochází k natahování krčku.



Obr. 16 Průběh tahové zkoušky plastů [31]

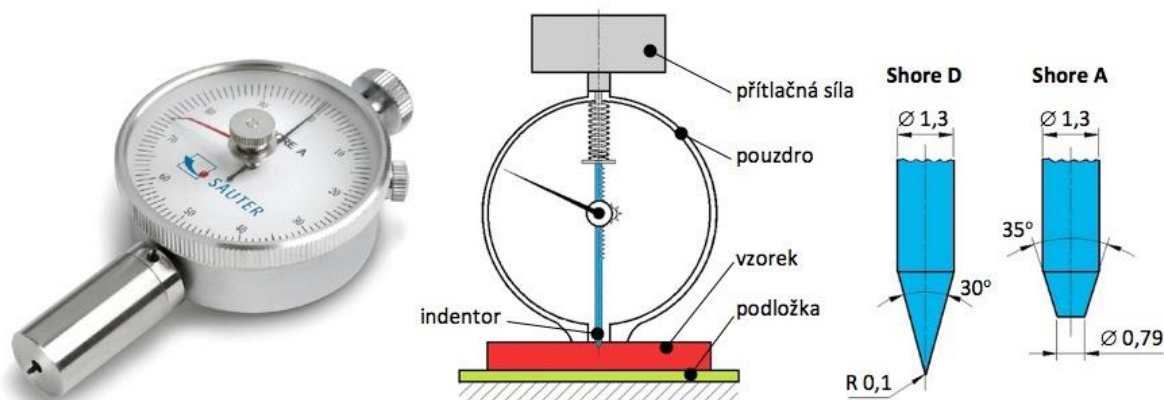
Mezi základní mechanické charakteristiky, které z deformační křivky (obr.17) určujeme, patří mez pevnosti  $\sigma_m$  – maximální napětí v tahu odpovídající největší síle  $F_{\max}$  naměřené během zkoušky. Dále sem patří napětí na mezi kluzu  $\sigma_y$  – napětí, při kterém dojde k počátku plastické deformace a začíná se tvořit krček. Toto napětí je považováno za horní hranici dovoleného napětí během provozu součásti, protože při jejím překročení vznikají plastické deformace.

U semikrystalických plastů nízké krystalinity je napětí na mezi kluzu shodné s mezí pevnosti. Napětí při přetržení  $\sigma_b$  je napětí, při kterém dojde k porušení zkušební tělesa a u křehkých amorfních termoplastů, včetně reaktoplastů, může být shodné s napětím na mezi pevnosti. Velmi mechanickou charakteristikou je také modul pružnosti  $E$ , který vyjadřuje tuhost polymeru. Hodnota modulu pružnosti se stanovuje z deformačních křivek v oblasti lineární závislosti napětí ( $\sigma$ ) na poměrném prodloužení ( $\varepsilon$ ) a kde tedy platí Hookův zákon.



- **Zkouška tvrdosti** probíhá obdobně jako u kovových materiálů, pouze s tím rozdílem, že kvůli viskoelastickému chování polymerů není možné kvůli elastickému zotavení měřit stopu po vpichu tvrdoměru. Místo toho je měřena rovnovážná hloubka vniknutí hrotu při konstantní síle zatěžování. Tvrdost polymerů je významnou mechanickou charakteristikou, která vyjadřuje odpor materiálu vůči vnikání jiného, tvrdšího materiálu. Nejvyšší tvrdosti mezi polymery dosahují reaktoplasty, nejnižší pak elastomery. Zkoušky tvrdosti nejsou pro plastové materiály jednotné, pro tvrdé plastové materiály je využívána převážně metoda dle Brinella a pro elastomery zkouška dle

Obr. 17 Srovnání pevnosti polymerů [6]

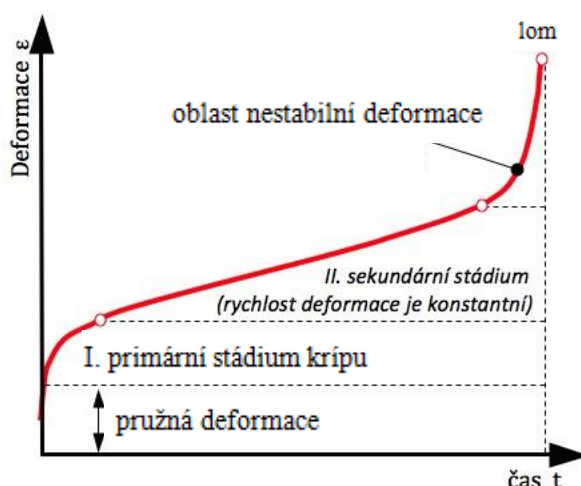


Obr. 18 Tvrdoměr . schéma a indentory [6]

Shoreho. Tyto metody se liší nejen tvarem vnikajícího tělíska (indentoru), ale také dobou zatěžování. Mezi nejvíce využívané metody měření tvrdosti patří právě metoda Shore, v závislosti na typu použitého indentoru ji dále můžeme rozdělit na metodu Shore A, která používá komolý kužel a je vhodná pro měkké polymery (používá přitlačnou sílu 10N), nebo Shore D, využívající kužel s kulatým vrchlíkem, která je vhodnější pro tvrdší polymery (přitlačná síla je zde 50N). Jako míra tvrdosti pak slouží hloubka vtlačení, která je odečítána po 1s, nebo po 15s. Tvrdost plastů je silně ovlivněna teplotou a může být upravena použitím aditiv. Příklady tvrdoměru, jeho schématu a použitelných indentorů jsou na obr.18.

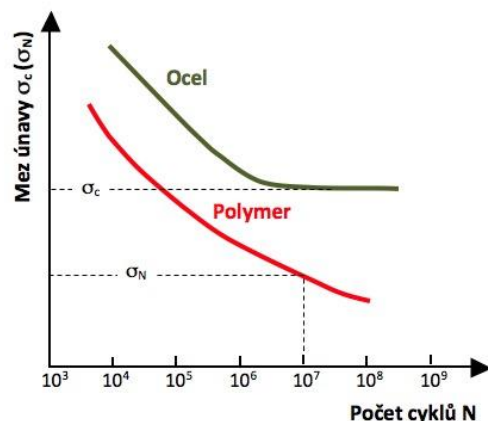


- **Křipové zkoušky** mají za cíl zjistit podrobné informace o dlouhodobém chování plastů při působení mechanického napětí. U řady polymerů totiž dochází k tzv. studenému toku - stavu, při kterém se plast deformuje při normální teplotě svou vlastní tíhou při relativně nízkém zatížení. Křip (tečení) je pomalá elastická a zároveň i plastická deformace tělesa narůstající s časem, vyvolaná konstantním mechanickým napětím. Křipové zkoušky jsou časově náročné a mohou trvat v extrémních případech i několik měsíců, po kterých je matematicky stanoven odhad dalšího chování z naměřených dat. Principem zkoušky je upevnění zkušební vzorku tvaru oboustranné lopatky na jednom konci a tahové zatěžování konstantní silou na konci druhém. Deformace se projeví prodloužením ve směru působící síly. Za předpokladu, že zmenšení zkušební průřezu je zanedbatelné, se sleduje protažení v různých časových intervalech a tyto hodnoty jsou použity k sestrojení základní křipové křivky (obr.19). Z křipových křivek je možné odečtením deformace v daném časovém okamžiku pro požadované hodnoty napětí sestrojit tzv. isochronní křivku závislosti napětí na deformaci, s jejíž pomocí je možné odhadnout maximální přípustné zatížení pro maximální deformaci při požadované době namáhání. Z isochronních křivek je stanoven křipový modul pružnosti pro dlouhé časy zatěžování, který odpovídá předpokládané životnosti výrobku a dosahuje výrazně nižších hodnot, než modul pružnosti získaný při krátkodobém zatěžování.

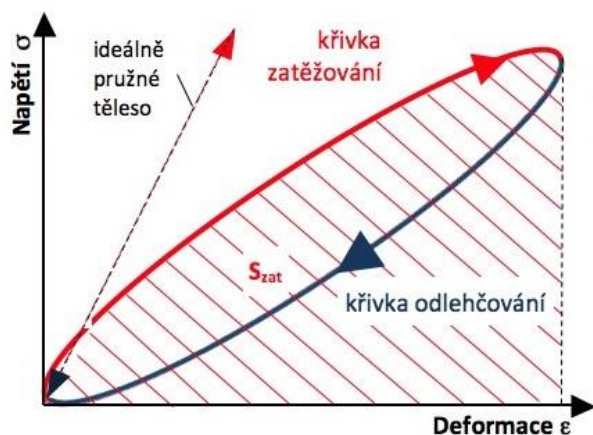


Obr. 19 Stádium deformace při křipu plastu [6]

- **Dynamické zkoušky** - v praxi jsou polymerní materiály namáhány nejen statickými, ale také dynamickými mechanickými zatíženími, typickým případem jsou pneumatiky automobilu, nebo ozubená kola v záběru. Pokud je součást vystavena časově proměnnému mechanickému namáhání, může během jejího provozu dojít k dynamické únavě materiálu. Ta je charakteristická tzv. únavovým lomem, kterému nepředchází žádná plastická deformace a součást se poruší křehce.



Obr. 20 Wohlerovy křivky [6]



Obr. 21 Hysterezní smyčka napětí v plastu [6]

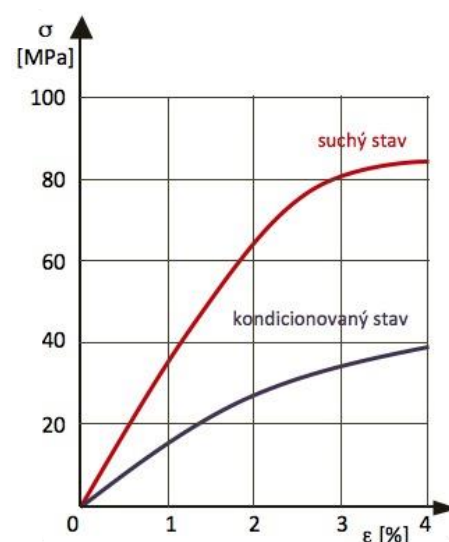
U polymerů o vysoké vrubové houževnatosti se však únavové trhliny šíří velmi pomalu a může dojít až k úplnému zastavení jejich růstu. Odolnost materiálu proti dynamickému namáhání vyjadřuje mez únavy  $\sigma_c$ . Principem zkoušky je cyklické mechanické zatěžování tělesa až do okamžiku porušení, s tím, že je zjišťován počet cyklů, které těleso vydrží do porušení lomem. Tyto hodnoty jsou zaneseny do grafu zvaného Wohlerova křivka (obr. 20). U polymerních materiálu se

se zvyšujícím se počtem cyklů snižuje napětí, které vyjadřuje odolnost materiálu proti únavovému lomu kvůli nerovnováze mezi působícím napětím a vnitřními silami. Nelze u nich proto stanovit mez únavy jako u kovových materiálů, ale používá se pro ně časová mez únavy  $\sigma_N$  pro předem stanovený počet cyklů, většinou  $N=10^7$ . Pro stanovení meze únavy se zatížení volí tak, aby spadalo do intervalu 5 až 80% meze pevnosti.

Při cyklickém namáhání tělesu dodáváme energii, jejíž část se po odtížení vrátí zpět, což je nazýváno elasticita. Část energie, která se však zpět nevrátí, se přemění v teplo, což je označováno jako tlumení. Při zjišťování tlumení je možné stanovit křivky závislosti napětí na deformaci pro zatěžování a odlehčování, které tvoří po ustálení děje hysterezní smyčku (obr. 21). Plocha pod křivkou zatěžování vyjadřuje množství práce vynaložené na deformaci vzorku. Plocha pod odlehčovací křivkou pak práci, která byla vrácena při odlehčování. Plocha mezi křivkami je hysterezní práce, která se přemění na převážně tepelnou energii, což označujeme jako disipaci. S rostoucí pevností polymerů hysterezní ztráty klesají. Charakteristickou veličinou cyklických jevů je dynamická tuhost, určená tangentou hysterezní smyčky.

### 2.1.6 Navlhavost plastů [10], [12], [14]

Jedná se o dlouhodobý proces příjmu vlhkosti z okolního prostředí, který probíhá do doby dosažení rovnovážného stavu, kdy vlhkost plastu odpovídá relativní vlhkosti okolního prostředí, navlhavost tedy není materiálovou konstantou. Doba navlhání polymeru je určena jeho chemickým složením, tloušťkou, relativní vlhkostí a teplotě okolí. Příčinou navlhavosti polymerů je jejich chemická struktura a složení. Nejvíce navlhají polymery, které v makromolekulárním řetězci obsahují silně elektronegativní prvky (kyslík, dusík, chlor), které díky své elektronegativitě dokáží přitahovat vazebné elektrony. Navlhavost tedy souvisí s polaritou polymerů, která je definována elektrickým dipólovým momentem látky – je přímo úměrná velikosti elektrických nábojů v molekule a obecně platí, že polární plasty (POM, PC, PA, PF) jsou navlhavé, zatímco nepolární plasty (PTFE, PE, PP, PS) jsou



Obr. 22 Vliv navlhavosti [6]

velmi málo navlhavé.

Odolnost nepolárních plastů vůči navlhání je daná především faktem, že jejich makromolekulární řetězce jsou tvořeny téměř výhradně atomy uhlíku a vodíku, které mají přibližně stejnou schopnost přitahovat elektrony. Dalším faktorem ovlivňujícím odolnost vůči navlhavosti jsou aditiva, organická plniva na bázi přírodního materiálu (celulózy), jako např. bavlna, nebo vlákna juty, navlhavost polymeru zvyšují, zatímco anorganická plniva, jako např. skleněná vlákna ji snižují. Důsledkem navlhavosti je zhoršení teplotních, elektrických a pevnostních charakteristik (obr.22) plastu doprovázený nárůstem houževnatosti, tažnosti a také rozměrů součástí. Navlhavost je tedy negativním aspektem plastů a je třeba je před zpracováním technologií vstřikováním vlhkosti zbavit (na méně než 0,2 % hmotnosti materiálu). Pro dosažení rovnovážného stavu plastů

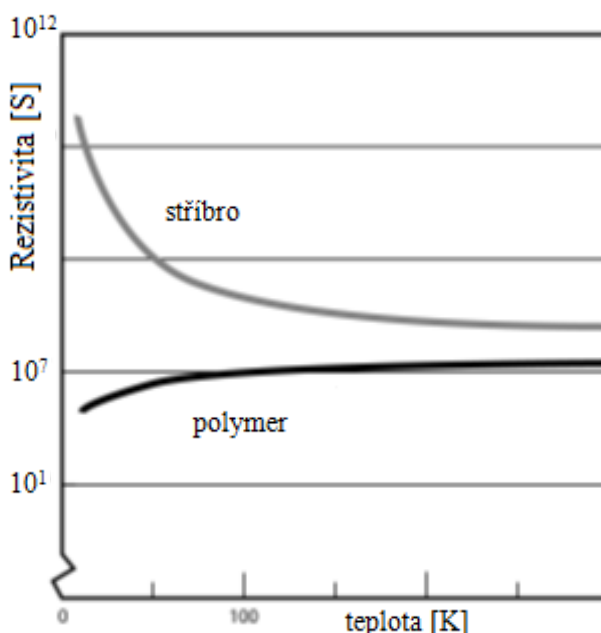


Obr.23 Příklad halogenového analyzátoru [6]

k teplotě a vlhkosti okolí je používána tzv. kondicionace, při které jsou plasty uloženy typicky při 23°C a relativní vlhkosti okolí 50% po dobu minimálně 88 hodin. Měření vlhkosti probíhá například pomocí halogenového analyzátoru (obr. 23), který je založen na termogravimetrickém principu, neboli stanovení vlhkosti na základě úbytku hmotnosti materiálu při jeho zahřívání.

### 2.1.7 Elektrické vlastnosti plastů [7], [8], [9], [11], [16]

Na rozdíl od většiny vlastností polymerů, elektrický odpor, resp. elektrická vodivost se s teplotou mění pouze minimálně (obr.24). Polymerní materiály obecně patří mezi dobré izolanty, které jsou široce využívány v elektrotechnickém průmyslu pro výrobu izolací vodičů, nebo v součástkách elektrospotřebičů. Jejich izolační schopnosti je možné zhoršit absorpcí vody, nebo specifickými přísadami (sazemi, grafitem), které z nich udělají vodivé materiály. Vodivé polymery se používají v mikroelektronice, kde nahrazují dosavadní křemíkové polovodiče. Měřítkem elektrické vodivosti je obecně u plastů povrchový izolační odpor (pp), definovaný jako poměr stejnosměrného napětí a proudu protékajícího na povrchu materiálu mezi dvěma elektrodami vztážený na jednotku plochy. Polymery s měrným povrchovým izolačním odporem  $pp < 10^4 \Omega$  jsou pokládány za elektricky vodivé. V intervalu (104 až 108)  $\Omega$  se nachází antistatické a nad 108  $\Omega$  izolační materiály. Naměřený odpor je ovšem výrazně závislý na geometrii součásti, takže je rozdělení ne zcela jednoznačné. Izolační vlastnosti mají za následek, že se polymery snadno nabíjí statickou elektřinou, jelikož se elektrostatický náboj nestačí dostatečně rychle odvádět. Může k tomu dojít přímým působením napětí, nebo pomocí

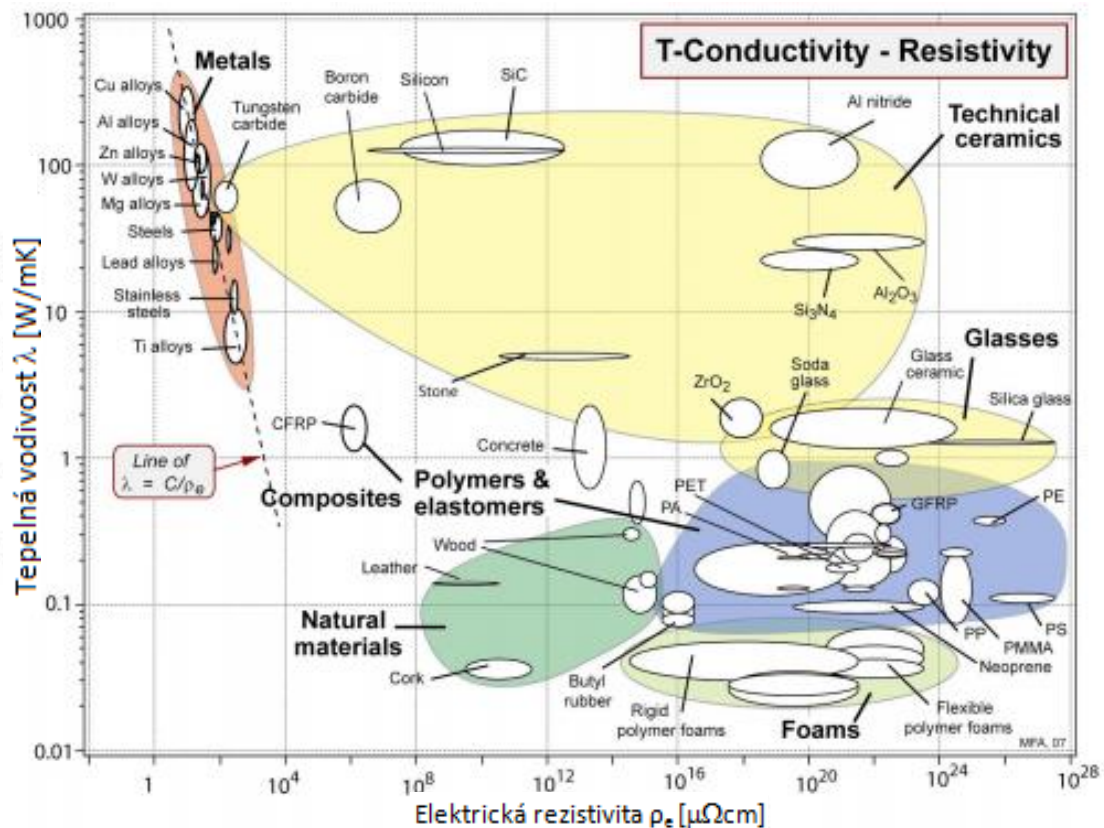


Obr.24 Srovnání elektrických vlastností plastového materiálu a stříbra [30]

tření. Jedná se o negativní efekt, který může brzdít výrobu, například kvůli ulpívání částí plastu na nežádoucích místech. Problémy spojené se statickou elektřinou jsou většinou řešeny přidáním antistatických přísad, které snižují povrchový odpor. Dalšími možnostmi je použití přísad, které udržují plast v navlhčeném stavu, nebo zařazení ionizačního vzduchového ventilátoru do výrobního procesu, který neutralizuje statickou elektřinu.

Progresivním způsobem pro výběr materiálu vhodného pro danou technologii zpracování je použití Ashbyho map, diagramů tvořených vzájemnými poměry požadovaných veličin v logaritmických souřadnicích v rámci jedné, nebo více materiálových skupin, kde jednotlivé materiálové skupiny jsou určeny uzavřenými poli. Autor této metody progresivního výběru optimálního materiálu pro danou aplikaci Michael F. Ashby jich ve své knize [45] představil velké množství – například pro poměr meze pevnosti k hustotě, modulu pružnosti vůči hustotě, nebo tvrdosti vůči teplotě tavení. Jednou z těchto závislostí je i poměr tepelné vodivosti k elektrickému povrchovému izolačnímu odporu (obr.25), jenž byl z jeho publikace pro ilustraci převzat. Na této mapě jsou přehledně zobrazeny elektroizolační vlastnosti vybraných polymerů ve srovnání s ostatními materiály v závislosti na tepelné vodivosti. Tento graf je zajímavý z hlediska výběru materiálu pro výrobu stínítka, jelikož je kladen požadavek na obě výše uvedené vlastnosti finálního výrobku a může tedy pomoci při rozhodování o výběru. Z hlediska výběru je zajímavá jeho modrá oblast charakterizující plastové materiály, v jejíž pravé dolní oblasti by se měl optimální materiál přibližně nacházet.





Obr.25 Ashbyho mapa materiálů [2]

### 2.1.8 Viskoelastické vlastnosti plastů [4],[5],[36],[37]

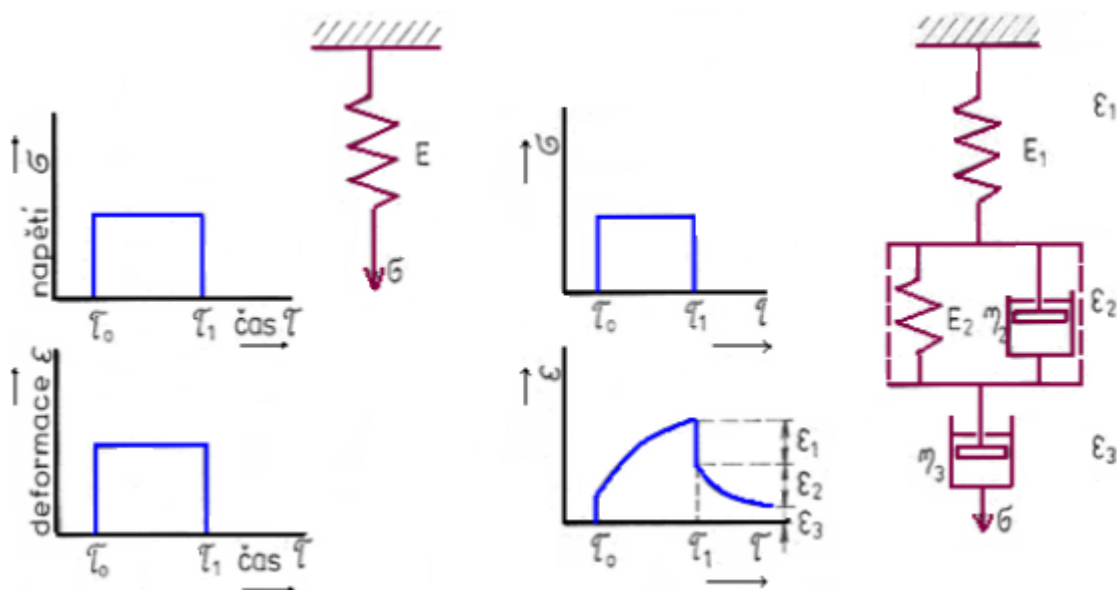
Jedním z projevů složité struktury polymerů je komplikované deformační chování, jelikož jejich deformace vyvolaná vnějším namáháním zahrnuje současně tři složky – elastickou, plastickou a zpožděně elastickou. Viskoelastické chování tedy znamená časovou závislost deformace a znázorňuje se pomocí Tuckertova modelu, který obsahuje tři členy a charakterizuje celkovou deformaci jako součet podružných deformací.

- Ideální, časově nezávislou, elastickou deformaci  $\varepsilon_1$ , která nastane okamžitě, zobrazenou jako pružinu.
- Elastickou časově závislou deformaci  $\varepsilon_2$ , zobrazenou jako Kelvinův model – paralelní zapojení pružiny a netěsného válce.
- Plastickou časově závislou deformaci  $\varepsilon_3$ , zobrazenou jako netěsný válec s pístem, která představuje viskózní tok.

Obecně lze říct, že se chování plastů neřídí Hookovým zákonem. Poměr mezi napětím a deformací je tedy funkcí času, po který napětí působí. Deformace plastu nenastává okamžitě, jelikož je zpomalována vnitřními odpory materiálu a čím rychleji má tato deformace proběhnout, tím je výraznější účinek brzdících členů. Na viskoelasticitu mají vliv teplota a rychlost deformace.

Při teplotě nižší než  $T_g$  se materiál chová téměř jako dokonale pružné těleso, při teplotě blízké  $T_f$  se chováním přibližuje ideální kapalině. Při namáhání rázem za vysokých rychlostí deformace, odpovídá výsledná deformace téměř pouze ideálně pružnému členu, kvůli tomu, že se vlivem velkého odporu kapaliny ve válcích ostatní složky nemohou uplatnit. Jednotlivé závislosti viskoelasticity plastů včetně odpovídajících reologických modelů jsou znázorněny na obr. 26.



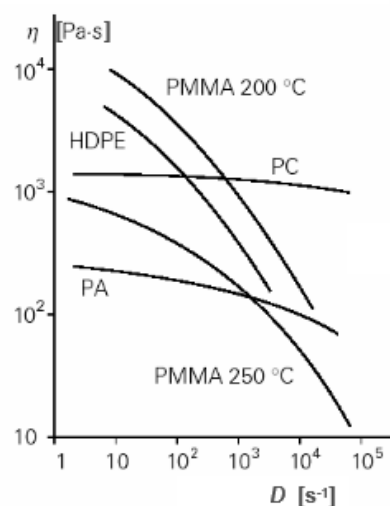


Obr.26 Schématické znázornění viskoelasticity plastu [5]

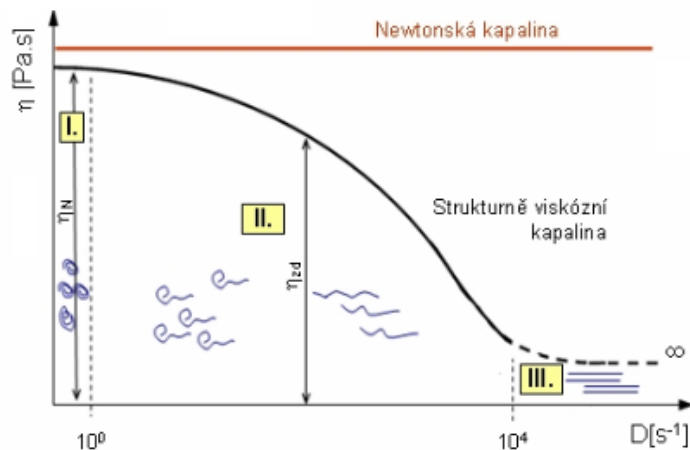
### 2.1.9 Reologie plastů [36],[19],[20]

Znalost tokových vlastností plastu je nezbytným předpokladem pro návrh výroby technologií vstřikování. Tokové vlastnosti taveniny jsou charakterizovány viskozitou, která je mírou vnitřního odporu při toku. Viskozita tavenin polymerů klesá s rostoucí rychlostí deformace a používá se pro ně pojem strukturně viskózní kapaliny. Z molekulárního hlediska můžeme tokové chování tavenin polymerů rozdělit na tři oblasti, zobrazené na grafu obr.28.

- **Oblast maximální Newtonovské viskozity** – při nízkých smykových rychlostech je možné považovat viskozitu za konstantní, rovnou maximální Newtonovské viskozitě. Je charakteristická amorfni strukturou a tvarem makromolekul odpovídajícím maximální entropii volně sbalených klubek, při toku přemísťovaných jako celek.
- **Oblast strukturní viskozity** – zde dochází k poklesu viskozity, způsobenému rozbalováním klubek polymerů ve směru toku. Hodnota viskozity závisí na okamžitých hodnotách smykového napětí a smykové rychlosti.
- **Oblast nekonečného smyku** – při velmi vysokých hodnotách smykové rychlosti se viskozita stává nezávislou na smykové rychlosti. Jedná se o v praxi nedosažitelný případ, kdy by došlo k dokonalému rozbalení makromolekul.



Obr.27 Křivky viskozity [22]



Obr.28 Oblasti viskózního chování plastů [22]

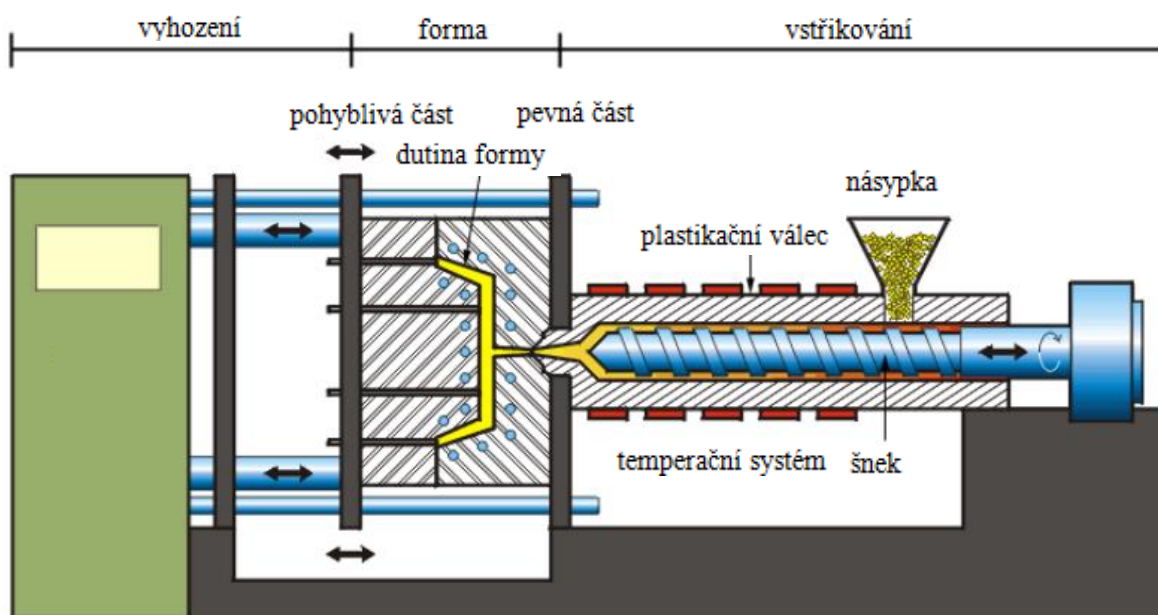
### 2.1.10 Příspěvky (aditiva) pro plasty [22],[6],[40]

V závislosti na tom, zda množství přísad v plastu ovlivňuje vlastnosti jeho polymerní matrice, rozlišujeme neplněné plasty, jejichž matrice není ovlivněna žádnou přísadou a plněné plasty, u nichž plnivo ovlivňuje základní mechanické a chemické vlastnosti. Existuje široká škála přísad, kterými je možné ovlivnit vlastnosti polymerní matrice.

- **Vyztužující plniva** zvyšují rázovou houževnatost, mez pevnosti a modul pružnosti. Patří mezi ně skleněná, uhlíková, kovová, aramidová, nebo jiná vlákna v délkovém rozsahu 3 až 16 mm.
- **Nevyztužující plniva** mají primárně za cíl snížení ceny plastu. Patří sem např. moučka z břidlice, kaolínu, nebo křídly.
- **Tepelné a světelné stabilizátory** jsou látky určené k zabránění degradaci plastu.
- **Maziva** usnadňují zpracování polymerů snížením viskozity, čímž ulehčují manipulaci a zabráňují lepení výrobku na stěnu formy. Patří sem např. vosky, stearáty Ca, Zn do obsahu max. 1%.
- **Barviva** jsou organické, nebo anorganické pigmenty, dodávající plastu požadovaný odstín. Organická barviva jsou rozpustná a zachovávají průhlednost polymeru.
- **Antistatika** jsou silně hydrofilní látky, které zvyšují elektrickou vodivost plastu.
- **Nadouvadla** jsou používány při přípravě lehčených hmot. Při zahřátí se rozkládají na plyny a tvoří pórovitou strukturu.
- **Tvrdidla** u pryskyřic působí vznik příčných vazeb (zesíťování).
- **Změkčovadla** jsou organické kapaliny s vysokým bodem varu, které zvyšují vnitřní pohyblivost makromolekul, což vede k poklesu sil mezi nimi. Zlepšují houževnatost a ohebnost materiálu na úkor meze pevnosti.
- **Retardéry hoření** zpomalují proces hoření.
- **Katalyzátory** ovlivňují rychlost chemického vytvrzování.

## 2.2 Princip technologie vstřikování plastů

Samotný proces technologie vstřikování plastů začíná nasypáním zpracovaného plastového materiálu, nejčastěji ve formě granulátu, do násypky, odkud je odebírán pracovními částmi stroje, tedy šnekem a pístem, aby byl dopraven do tavicí komory, kde je roztaven působením vysoké teploty a tření. Tavenina je z tavicí komory následně vstřikována do dutiny formy, kterou zcela vyplní a získá tak tvar konečné součásti. Následný dotlak se stará o redukci smrštění a dalších rozměrových změn. Po ztuhnutí postupným ochlazením plastu ve formě vzniká finální výrobek, který je při otevření formy vyhozen vyhazovacím systémem, který může být doplněn robotickým ramenem a celý výrobní proces se znovu opakuje. Jedná se o komplikovaný fyzikálně-chemický proces, pro jehož optimální funkci je třeba brát v úvahu všechny aspekty vstřikování, které budou nyní podrobně rozebrány.

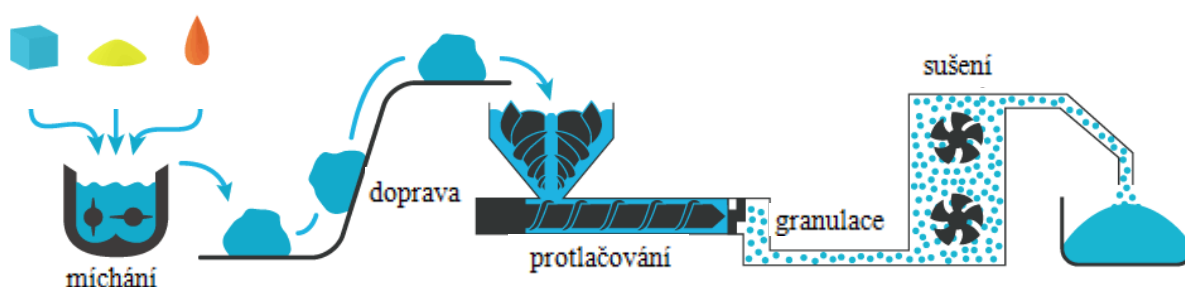


Obr. 29 Schématické znázornění vstřikovací jednotky [46]

### 2.2.1 Přípravné zpracování plastů [22],[12],[33]

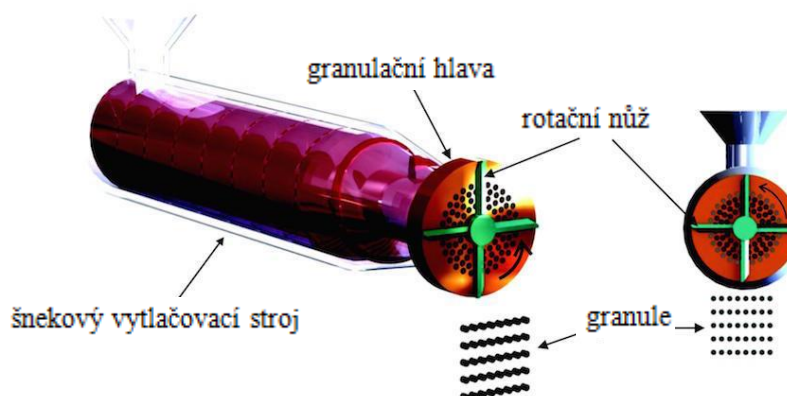
Ještě před započítím samotného procesu vstřikování je nutné zpracovat plastový materiál do dané formy, případně tvaru, který odpovídá požadavkům konkrétní aplikace vstřikování. Patří sem několik podružných technologií spojených s technologií vstřikování plastů, kterými jsou míchání a hnětení, granulace, sušení a doprava materiálu. Zmíněna bude také možnost recyklace. Celý proces přípravy materiálu je schematicky znázorněn na obr. 29.

- **Míchání a hnětení** je využíváno, pokud je potřeba smíchat alespoň dvě složky tak, aby byl dosažen požadovaný stupeň rovnoměrnosti rozložení jednotlivých komponentů granulátu, nebo prášku. Typy míchání je možné rozlišit podle velikosti odporu, který promíchávaný substrát klade vnější míchací síle. Jsou to míchání s nepatrným odporem proti posunutí, kam patří naprostá většina míchání prášků a míchání s velkým odporem proti posunutí. To se dělí na intenzivní míchání, kde stupeň homogenity závisí na velikosti smykového namáhání a promíchávaná hmota je ve změkklém stavu, což bývá označováno jako hnětení a je prováděno v hnětičích. Druhou variantou je extenzivní míchání, kde stupeň homogenity závisí na stupni tečení a typicky se používá pro míchání prášků s barvivy v míchačkách. Hnětací stroje jsou schopné na rozdíl od míchacích převést plasty do formy taveniny intenzivním smykovým namáháním. Podle způsobu práce se hnětací stroje dělí na diskontinuální, které jsou pružnější při změně materiálu na úkor kvality a kontinuální, vysoce přesné, ale s nutností přesného dávkování.



Obr. 30 Schématické znázornění průběhu přípravného zpracování plastů [26]

- Technologie granulace** patří mezi nejpoužívanější zpracování plastů pro vstřikování, jelikož mají dobrou sypnou hmotnost a lze je dobře míchat s aditivy. Typickými tvary granulí jsou krychle, čoky a válečky. Existují dva základní typy technologie granulace – granulace ze strun (za studena nebo za tepla) a granulace z pásu. Výběr konkrétní varianty se řídí především vlastnostmi taveniny (tekutost, tvrdost, hustota) a ekonomikou procesu. Principem granulace z pásu je rozřezání vstupního plastového polotovaru tvaru desky na proužky pomocí kotoučových nožů a následné rozsekání bubnovými rotačními noži na granulát. Metoda je nevhodná pro tvrdé materiály a v praxi používána např. pro granulaci PA. Při granulaci ze strun (obr. 31) dochází k protlačování taveniny skrz granulační hlavu s velkým množstvím otvorů, díky čemuž získá tavenina tvar strun. Ty jsou dále vedeny vodicími válečky přes chladicí kapalinu (vodu) a následně sekány na granule. Nevýhodou je nutné sušení a riziko slepení jednotlivých strun, kterých je velké množství. Typicky se takto připravuje ABS. Při granulaci ze strun za tepla jsou granule odřezávány bezprostředně po průchodu granulační hlavou za současného chlazení vodou, nebo vodní mlhou. Tato varianta není vhodná pro plasty s vysokou tekutostí taveniny. Typická je příprava PP.



Obr. 31 Nástroje pro granulaci ze strun [6]








- Sušení** je technologický proces, který vede ke snížení obsahu absorbované vlhkosti a je nutný, pokud plast přišel před zpracováním vstřikováním do kontaktu s vodou, což zpravidla nastává např. při granulaci, kde struny plastu prochází vodní lázní. Typickým negativním projevem navlhklých plastů po zpracování je zhoršení kvality povrchu výrobků tvořením šmouh, bublinek, nebo tzv. stříbřením. Samotné sušení probíhá buď v samostatných sušicích zařízeních, nebo v plastikační jednotce stroje vybavené odplyněním. Je nutné stanovit dobu sušení, při které se vlhkost materiálu dostane na vyhovující hodnotu nižší než 0,1%. Vliv doby sušení na vlastnosti vybraných materiálů je uveden v tabulce 1. Jelikož je sušení i navlhání vratný děj, začne materiál po vysušení při kontaktu s atmosférou opět navlhat, protože běžná atmosférická vlhkost dosahuje dle ročního období rozmezí 60 až 80%. Proto je snaha mít v násypce pouze takové množství materiálu, které se stihne spotřebovat během cca 30 minut,

a násypky jsou navíc vybaveny zařízeními, které jsou určeny pro zabránění navlhání směsi. Patří mezi ně stacionární sušárny, které pracují v periodickém, nebo nepřetržitém provozu a dělí se především podle toho, jaký typ vzduchu pro sušení používají. Je nutné dodržet doporučené doby sušení, jinak hrozí nebezpečí tzv. termooxidačního stárnutí, označovaného také jako přesušení, které se projevuje ztrátou lesku, změnou barvy (např. zežloutnutí u polyamidu) a dalšími změnami vlastností plastového materiálu.

Tab. 1 Doba sušení a vliv vlhkosti na vybrané plastové materiály [6]

PLAST	Teplota sušení [°C]	Doba sušení – cirkulující vzduch [hod]	Doba sušení – čerstvý vzduch [hod]	Doba sušení – suchý vzduch [hod]	Přípustný zbytkový obsah vlhkosti [%]	Důsledek vlhkosti
PA6	80	Nevhodné	Nevhodné	4 až 12	0,1	Vzhledové vady, hydrolyza
SAN	80	2 až 3	1 až 2	1 až 2	0,2	Vzhledové vady
ABS	80	3 až 6	2 až 3	1 až 2	0,2	Vzhledové vady
PC	120	4 až 12	2 až 4	2 až 3	0,002	Vzhledové vady a hydrolyza
PBT	120	4 až 8	2 až 3	2 až 3	0,04	Vzhledové vady a hydrolyza

- **Recyklace plastů** zahrnuje opětovné využití odpadu vzniklého při zpracování plastů. Rozlišujeme dva druhy odpadu - technologický a užitný. Do užitného odpadu patří plastové díly, u kterých se projevuje proces stárnutí a je většinou znehodnocen trvalou změnou vlastností, nebo povrchovými úpravami a znečištěním a není tedy pro další zpracování vhodný. Jedná se

	PET	Např. lahve, folie, atd.
	HDPE	Např. lahve na mléko, obaly na kosmetiku, automobilový průmysl, hračky, atd.
	PVC	Např. Obaly na jídlo, láhve, folie, okenní profily, hračky, atd.
	LDPE	Např. nádržky a nádoby, folie, nádoby, atd.
	PP	Např. krabičky na jídlo, exteriérové a interiérové díly, hračky, at.
	PS	Např. misky na tvaroh, jogurty, jídlo, izolace, obaly v elektrotechnice, atd.
	Ostatní	Aplikace dle typu polymeru

Obr. 32 Obvyklé značení recyklovatelných plastů [6]

typicky o tříděný odpad ze spotřebního zboží. Naproti tomu technologický odpad, může být

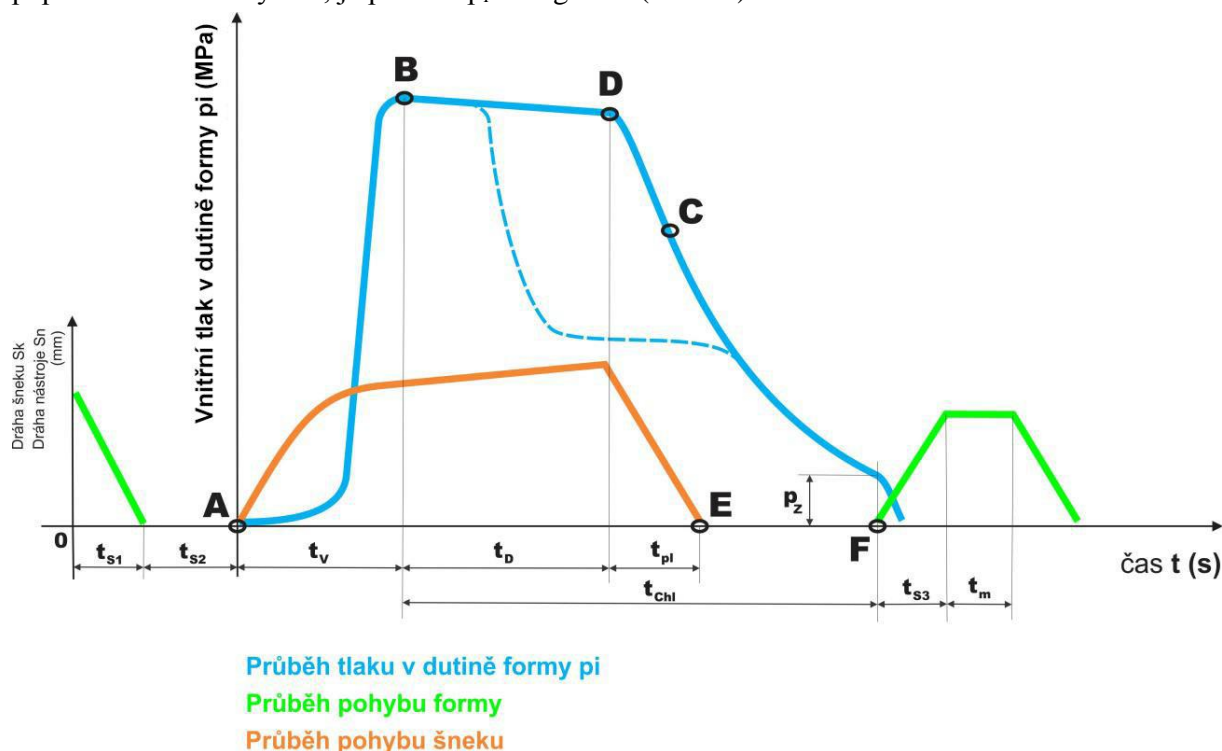
navrácen do výrobního procesu, buď ve formě recyklátu, nebo regenerátu. Regenerát se od recyklátu liší tím, že je kromě nadrcení a rozemletí navíc granulován a případně ještě upraven aditivy. Výhodou použití regenerátu je snadná možnost regulovat jeho jemnost nastavením velikosti ok na granulovacím sítu. Nevýhodou je, že recyklát, ze kterého regenerát vzniká, často obsahuje určité procento prachových částic, a je proto nutné technologicky vyřešit odsávání prachu. Navíc další teplotní cyklus může způsobit degradaci polymeru. Odpad vhodný pro



průmyslovou recyklaci musí být specifikován jako čistý tříděný odpad. Zdroje recyklovaných materiálu jsou uvedeny na obr.

### 2.2.2 Vstřikovací cyklus [6],[19],[29],[37],[20]

Vstřikovací cyklus je tvořen přesnou posloupností postupových kroků, během kterých vzniká výsledný produkt technologie vstřikování. Pro jeho detailní popis je nutné stanovit počátek cyklu, za který je obvykle považován bod impulsu k uzavření formy. Jednou z možností, jak popsat vstřikovací cyklus, je pomocí  $p_i$ - $t$  diagramu (obr. 33).



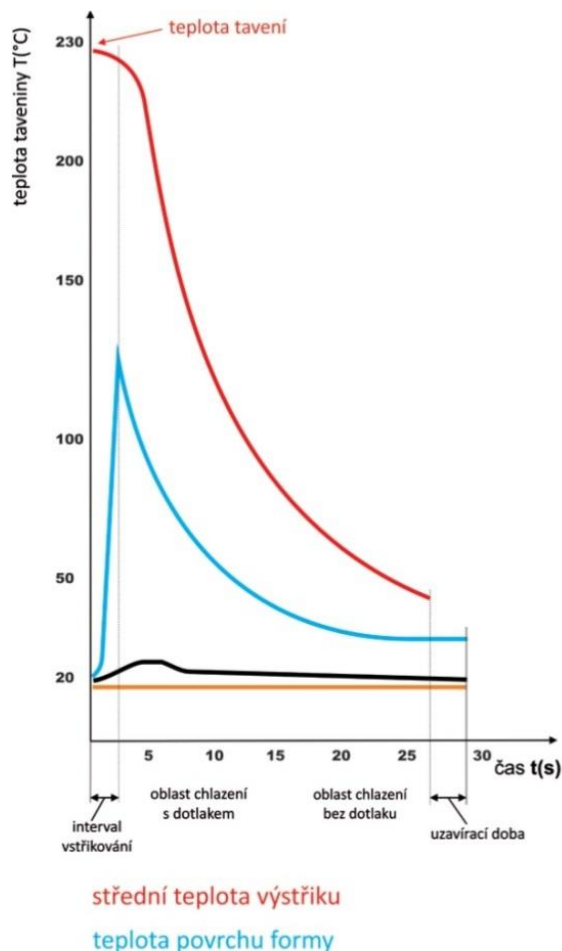
Obr. 33 Časový diagram průběhu tlaku během vstřikovacím cyklu [6]

Za nulový bod tedy považujeme čas, kdy je prázdná forma otevřená a stroj dostává impuls k zahájení cyklu vstřikování. Během časového úseku  $t_{s1}$  dojde k uzavření formy a jejímu „uzamčení“. Časový úsek  $t_{s2}$  popisuje variantu, že se vstřikovací jednotka vstřikovacího stroje přisouvá k formě, což závisí na konstrukci vstřikovacího stroje. V bodě A je šnek v tavicí komoře uveden do pohybu a začíná vstřikování taveniny do dutiny formy, které trvá po čas  $t_v$ , nazývá se doba plnění a je během něj dosaženo maximálního tlaku. Tento děj končí v bodě B a objem taveniny přitom obsahuje až 97% objemu dutiny formy. Dále nastává fáze chlazení ( $t_{ch}$ ), která trvá až do otevření formy a vyjmutí výstřiku. Během chladnutí se materiál smršťuje a zmenšuje svůj objem, proto je nutné kompenzovat pokles objemu dodatečným tlakem, aby na výstřiku nedošlo k vytvoření propadlin, nebo staženin. Tato fáze se nazývá doba dotlaku ( $t_d$ ). Velikost dotlaku může mít stejnou hodnotu, jako maximální tlak, nebo se může po několika vteřinách snížit a další chladnutí tak probíhá za sníženého tlaku, proto dotlak rozdělujeme na izobarický a izochorický, a je ukončen v bodě D. Bod C značí okamžik ztuhnutí taveniny ve studeném vtokovém kanálu a pro pokračování dotlaku se musí před šnekem nacházet cca 5 až 15% objemu taveniny, na kterou bude šnek čelem působit, a jehož přesný objem se liší podle velikosti výrobku. Následuje časový úsek  $t_{pl}$ , během kterého začíná plastikace další dávky plastu, trvající do bodu E. Šnek pod násypkou nabírá novou granulovanou hmotu svým otáčením a plastikuje ji za současného vtlačování do prostoru před čelem šneku. Pohybuje se přitom směrem dozadu a musí přitom překonat zpětný tlak. Výška protitlaku musí být přesně stanovena, nebo způsobí degradaci plastu. Pokud je stroj vybaven pohyblivou tavicí komorou, tak dále přichází časový úsek pro její odsunutí od formy a přitom se tlak ve vstřikovací formě dále snižuje až na hodnotu zbytkového tlaku  $p_z$ ,

tlaku působícím na výstřik těsně před otevřením formy. V bodě F dojde k otevření formy a výstřik je z ní vyhozen, což popisuje strojní čas  $t_{s3}$ . Pokud je stroj vybaven manipulátorem, který vyjímá výstřik z formy, je tomu navíc vymezena doba manipulace  $t_m$ , která má univerzální využití a může sloužit např. také pro popis doby očištění formy, nebo vkládání kovových zálsků.

V rámci časového rozdělení vstřikovacího cyklu rozlišujeme následující úseky:

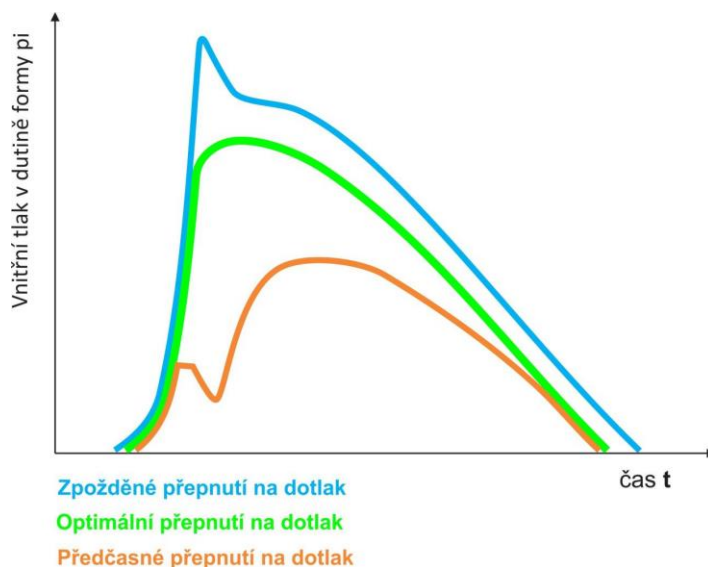
- **Doba strojní** zahrnuje strojní časy pro uzavření vstřikovací formy  $t_{s1}$ , na případné přisunutí a odsunutí vstřikovací jednotky  $t_{s2}$ , pokud je takto konstrukčně řešená a na otevření vstřikovací formy  $t_{s3}$ , do které bývá započítána i doba pro vyhození výstřiku z formy. Všechny tyto strojní časy jsou závislé na rychlosti pohybu vstřikovacího stroje vůči dráze, kterou musí vstřikovací forma urazit. Dráha otevření vstřikovací formy je určena rozměry výstřiku ve směru otevření formy a musí být dostatečně velká, aby bylo možné výstřik bez potíží vyjmout. Trendem v oblasti zkracování výrobních časů je proměnná rychlost zavírání formy, kdy se forma na začátku pohybu zavírání pohybuje velkou rychlostí a těsně před dojezdem na doraz plynule sníží rychlost, aby se forma rázem nepoškodila.
- **Doba vstřikování** patří mezi nejdůležitější úseky při vstřikování, při kterém dochází k plnění tvarové dutiny formy a má významný vliv na výsledné vlastnosti výstřiku. Jedná se o velmi krátký časový úsek, během kterého nesmí ztuhnout tavenina čela plastu. Plnění musí být rychlé také z toho důvodu, že tavenina kontaktem s chlazenou formou ztrácí tekutost. Cílem je vyhnout se plnění formy tzv. volným tokem, který má negativní důsledky na strukturu výstřiku. Preferovaným způsobem je plnění laminárním tokem, což je složitý mechanismus postupného plnění formy. Kontaktem taveniny s formou dochází okamžitě k vytvoření ztuhnuté vrstvy nepohyblivé taveniny v důsledku toho, že je teplota na lici vstřikovací formy několikanásobně nižší, než teplota taveniny, tavenina tak proudí pouze plastickým jádrem s vysokou tekutostí, kterým je dutina formy postupně vyplněna. Vzhledem k tomu, že se uprostřed tloušťky stěny nachází oblast nejvyšší rychlosti tečení a tato rychlost se směrem ke stěně formy snižuje, nastává na čele toku taveniny radiální zakřivení a pokles vstřikovacího tlaku. Konec fáze vstřikování se pak vyznačuje prudkým nárůstem tlaku ve formě, který je kompenzován dotlakem. Plnění tvarové dutiny formy taveninou je zajištěno axiálním pohybem šneku, jehož rychlost pohybu je závislá na technologických podmínkách, jako teplota taveniny, vstřikovací tlak a teplota vstřikovací formy. Dále je rychlost vstřikování závislá na geometrii výstřiku - s větším objemem roste vstřikovací čas. Rychlost také významně ovlivňuje viskozita materiálu a jeho typ (polymery s krátkými vlákny mají lepší tekutost, než kompozity s dlouhými vlákny), průměr vstřikovací trysky a druh vtokové soustavy. Správné stanovení vstřikovací rychlosti má zásadní vliv na kvalitu výstřiku, příliš vysoká rychlost má za následek výraznou orientaci makromolekul a nebezpečí teplotní degradace materiálu. Proto jsou pro volbu rychlosti



Obr.34 Teplota taveniny při vstřikování [23]

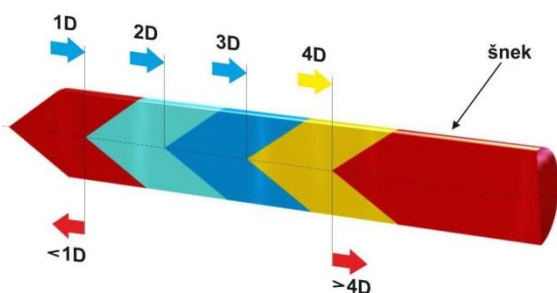
používány simulační CAD systémy, jako jsou MOLDFLOW a CADMOULD.

- **Doba dotlaku** má za cíl kompenzaci smrštění výstřiku během chladnutí plastu ve formě, což je možné vykonávat pouze do doby, dokud je možné dodávat taveninu do dutiny vstřikovací formy (do bodu C v p-t diagramu). Z praktického hlediska je výhodné ukončit dotlakovou fázi ještě před zatuhnutím vtoku, jinak v této oblasti dojde ke vzniku vysokého pnutí. Trvání doby dotlaku  $t_d$  závisí především na průřezu vtokového kanálu a teplotách taveniny a formy, dosahuje zpravidla několik až desítky vteřin a časově se překrývá s dobou chlazení. Funkcí dotlaku je také snížení tlaku uvnitř dutiny formy, jelikož po zaplnění tvarové dutiny formy následuje stlačení taveniny, tlak prudce stoupne a rychlost poklesne. Pokud by se tlak nezměnil po celou dobu vstřikování a zůstal na hodnotě vstřikovacího tlaku, došlo by k výraznému namáhání formy tlakem, který by mohl způsobit vznik pnutí ve výstřiku, nebo dokonce částečné krátké otevření formy, či jejímu prasknutí. Proto je vstřikovací tlak přepínán na dotlak. Opožděné přepnutí však znamená riziko nedostříknutého výrobku, proto musí být doba dotlaku stanovena velmi přesně. K přepnutí dochází většinou při dosažení požadovaných hodnot tlaku ve vstřikovací formě, v hydraulice, podle dráhy šneku nebo podle vstřikovacího času. Jako nejvýhodnější se jeví varianta přepínání na dotlak podle tlaku ve formě, který je zjišťován tlakovými čidly ve formě. Výhodou přepínání na dotlak podle tlaku v dutině je řízení procesu nezávislé na vstřikovací jednotce s vyloučením vlivu teploty taveniny.



Obr. 35 Vliv času přepnutí dotlaku na tlak ve formě [23]

- **Doba plastikace** zajišťuje dávkování nutného množství taveniny pro další vstřikovací cyklus před čelo šneku. Během fáze plastikace je plast roztaven vlivem tření o stěny tavné komory, třením mezi granulemi plastu navzájem a také vlivem tepla působícího od elektrických topných těles na obvodu tavné komory. Zhruba dvě třetiny tepla vznikají v důsledku tření a jedna třetina je dodána elektrickým vytápěním. Cílem této fáze je dosáhnout požadované teploty taveniny při jejím současném zplastikování, rovnoměrné homogenizaci a umístění před čelo šneku. Objem zplastikované dávky taveniny musí zajistit i tzv. polštář – objem taveniny plastu určený pro kompenzaci smrštění, což bývá většinou mezi 5 až 15% objemu výstřiku. Celkový vstřikovací objem se tedy skládá z objemu dutiny vstřikovací formy, vtokové soustavy a polštáře, což by nemělo překročit hodnotu čtyřnásobku poloměru šneku, jelikož pak hrozí nebezpečí vzniku vzduchových bublin ve vstřikovaném díle. Doba plastikace nemá na celkovou délku vstřikovacího



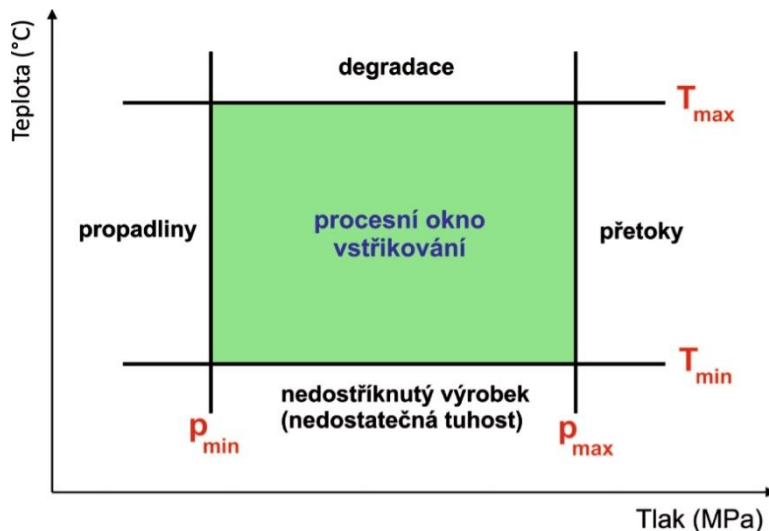
Obr. 36 Dávka plastu pro vstřikovací cyklus [23]



cyklu vliv, jelikož probíhá souběžně s dobou chlazení.

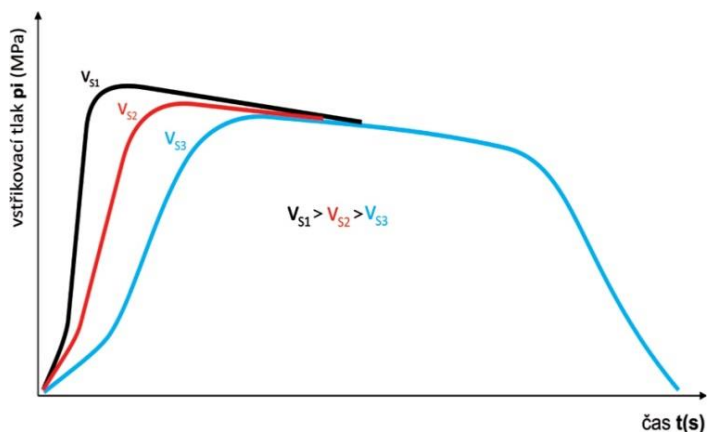
- **Doba chlazení** je fází, při níž dochází k chladnutí taveniny v dutině vstřikovací formy, což začíná od okamžiku prvního kontaktu taveniny plastu s chladnější formou při vstříknutí a trvá během doby dotlaku až do úplného ztuhnutí výstřiku. Hotový dílec má při vynětí z formy vyšší teplotu než je teplota okolí, ke zchlazení na teplotu okolí tedy dochází mimo formu. Jedná se o nejdelší fázi celého vstřikovacího cyklu z toho důvodu, že se plasty obecně vyznačují nízkou tepelnou vodivostí. Doba chlazení  $t_{chl}$  se tedy může pohybovat až v řádu několika minut u výstřiků s velkou tloušťkou stěny. Nejčastěji používaným technologickým řešením chlazení je průtok chladicího média, což je ve většině případů voda, u níž je rozdíl mezi teplotou při vstupu a výstupu z chladicího okruhu menší než 3 °C. Ve většině případů je chlazení pro pohyblivou a statickou část formy řešeno samostatně. Délka doby chlazení závisí především na geometrii výstřiku (jeho maximální tloušťce), druhu plastu (liší se teplotní vodivostí jednotlivých plastů) a teplotách formy a taveniny.

Existuje množství technických parametrů ovlivňující proces vstřikování, které jsou zobrazeny na obr. 37, což je schéma, označované jako „procesní“ technologické okno a slouží k orientační kontrole správnosti zvolených parametrů vstřikování.

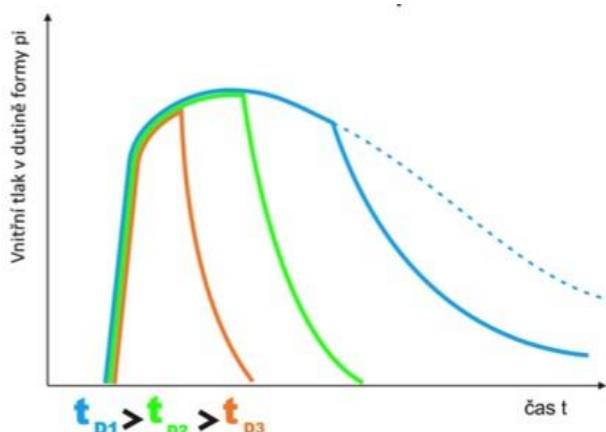


Obr. 37 Procesní technologické okno [23]

Pro dosažení maximální kvality vstřikovaných dílů je třeba schopnost přesného řízení procesu vstřikování, kterého je možné docílit pomocí změny parametrů vstřikovací rychlosti  $v_{vst}$ , vstřikovacího tlaku  $p_v$ , velikosti dotlaku  $p_d$  a jeho trvání, teploty taveniny  $T_{tav}$  a formy  $T_f$ . Jednotlivé parametry se při změně každého z nich navzájem ovlivňují. První ze zmíněných parametrů, vstřikovací rychlost, ovlivňuje především dobu plnění dutiny formy taveninou a s její rostoucí hodnotou dochází k výraznějšímu růstu hodnoty vnitřního tlaku. Vlivem vysoké rychlosti



Obr. 38 Vliv vstřikovací rychlosti na tlak ve formě [23]



Obr. 39 Vliv doby dotlaku na vnitřní tlak ve formě [23]

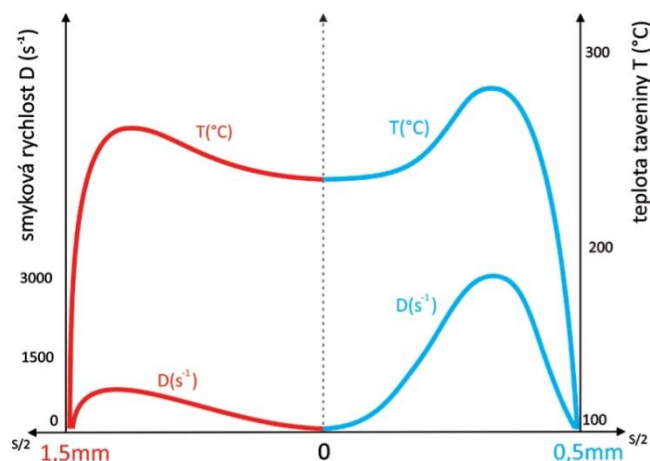
vstřikování dochází dále k nárůstu smykového namáhání taveniny a klesá její viskozita, což vede k nárůstu teploty taveniny a orientace. Mimo vstřikovací fázi se dále změna hodnoty vstřikovací rychlosti neprojevuje. Dalším parametrem je vstřikovací tlak, jehož změna výrazně ovlivňuje změnu tlaku v dutině vstřikovací formy a zároveň dobu plnění. S vyšším vstřikovacím tlakem poroste tlak v dutině formy a dojde ke zrychlení procesu plnění formy, což bude mít za následek zvýšení teploty taveniny a prodloužení doby chlazení. Velikost dotlaku má pravděpodobně největší vliv na průběh tlaku ve vstřikovací formě

a výslednou kvalitu výstřiku. Zvýšení hodnoty dotlaku působí zvýšení tlaku ve formě a zpravidla také způsobí celkové prodloužení tlakové křivky spojené s prodloužením doby chlazení. Roste přitom hmotnost výstřiku za současného poklesu velikosti smrštění, ale vzniká při tom pnutí ve výrobku. Naproti tomu příliš nízká hodnota dotlaku má za následek vznik propadlin. Doba dotlaku je výrazně spojena se ztuhnutím vtokového ústí u studených vtokových soustav. Příliš nízká hodnota vede k velkému smrštění a propadlinám, jelikož u nezatuhlého vtokového ústí dochází ke vzniku vzduchových bublin a kolísá hmotnost výstřiku. Naopak při příliš vysoké hodnotě může dojít k tzv. přetlačení dílce – tvorbě zástříků. Dotlak je možné vykonávat pouze do doby, než zatuhne vtokové ústí, dále už není možné taveninu dotlačovat. Nárůst teplot ve formě pak vede ke zvyšování vnitřního tlaku a prodloužení chladicí a dotlakové fáze.

### 2.2.3 Průvodní jevy procesu vstřikování [27],[22],[37]

Proces vstřikování plastů je obecně charakterizován poklesem tlaku a teploty během času, které mají za následek vznik nehomogenních teplotních a napěťových polí. Ty jsou příčinou následujících jevů, nastávajících během, nebo po skončení procesu vstřikování.

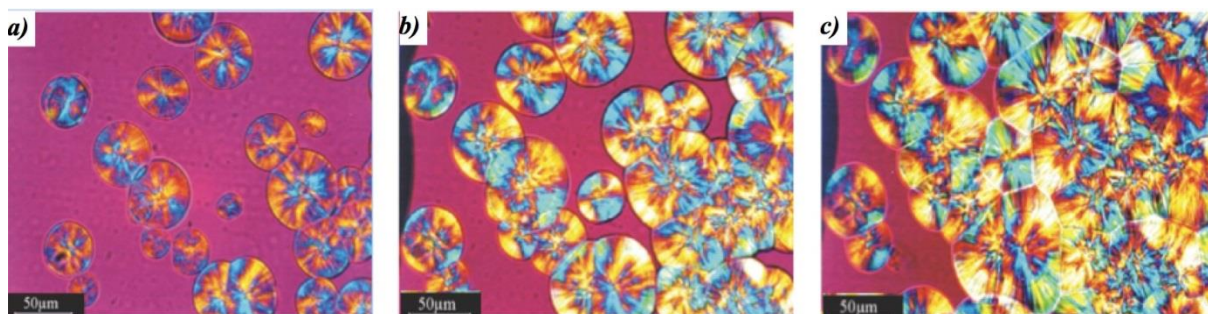
- **Orientace** makromolekul a plniva plastu je typickým průvodním jevem zpracování termoplastů. Dochází k ní vlivem „rozbalování“ stočených makromolekul termoplastu, které jsou do směru vtoku vstřikovány vysokou rychlostí a pod vysokým tlakem. V této poloze dojde k jejich ztuhnutí. Úroveň orientace a anizotropie odpovídá tomu, jak moc se makromolekuly „rozbalí“ během vstřikování. Parametry, které nejvíce ovlivňují orientaci, jsou teplota taveniny a formy, jejichž vyšší hodnota snižuje orientaci a vstřikovací tlak, jehož zvyšující se hodnota zvyšuje anizotropii a orientaci. Anizotropie neboli nestejně vlastnosti v podélném a příčném směru, je součástí orientace. Podmínky pro vznik orientované struktury se v jednotlivých oblastech výstřiku liší. Rozdílné podmínky jsou dány především rozdílným působením smykového napětí na



Obr. 40 Vliv parametrů vstřikování na orientaci [23]

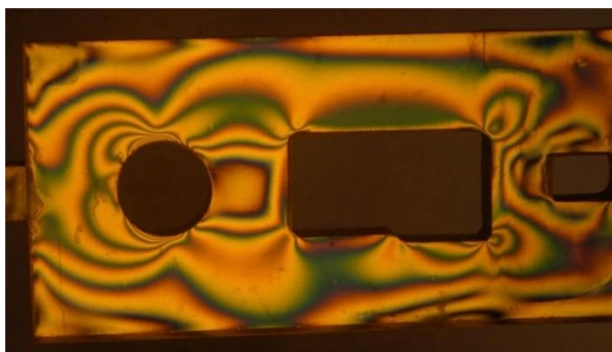
jednotlivé části toku taveniny. Tenké vrstvy taveniny, které jako první tuhnou na stěnách formy, zůstanou neovlivněny smykovým napětím. Největší smyková napětí pak působí ve vrstvě těsně pod ztuhlou povrchovou vrstvou taveniny a směrem k ose toku se smyková napětí snižují až k nule. Největší orientace je tedy těsně pod povrchem a směrem k ose výstřiku se ztrácí. Orientace také závisí na vzdálenosti zkoumaného úseku od ústí vtoku. Smyková napětí, která vyvolávají orientaci v tavenině, jsou úměrná tlaku, s rostoucí vzdáleností od vtoku se orientace snižuje. Anizotropie nenastává u reaktoplastů, vlivem zesílení se u nich neprojeví. Opačným jevem orientace je relaxace. Důsledkem orientace je anizotropie smrštění i dalších vlastností plastů, jako jsou tepelné, mechanické a elektrické vlastnosti.

- **Krystalizace** je charakteristická pro semikrystalické plasty, jejichž krystality vznikají tak, že se makromolekuly sdružují do přibližně pravidelných útvarů, jako jsou lamely, nebo vlákna (fibrily). Oblasti mezi krystalickými útvary mají amorfni strukturu, jelikož krystalizace nikdy neproběhne v celém objemu taveniny. Krystalizace probíhá především během tuhnutí taveniny ve formě, při teplotě nižší, než teplota tání daného polymeru, nebo dodatečně velmi pozvolně při dodatečném ohřevu dílu, závisí tedy na teplotě vstřikovací formy. Typicky míra krystalinity roste od povrchu ve směru k jádru stěny výstřiku. Teplé a silnostěnné formy jsou tedy náchylné na vznik různě velkých sférolitických útvarů, jejichž největší podíl se nachází v jádrech stěn. Rozdílná struktura je zdrojem smrštění a vzniku pnutí ve výstřiku. Podmínkou vzniku krystalické fáze je krom technologických podmínek (tlak, teplota a čas), vznik krystalických zárodků (nukleace), které mohou vzniknout přímo z polymeru (homogenní krystalizace), nebo na aditivech (talek, křída, skleněná vlákna) a nečistotách (heterogenní proces). Heterogenní krystalizace je charakteristická jemnější krystalickou fází, která se nachází i na povrchu plastového dílu. Krystalické fáze je možné pozorovat pomocí mikroskopu, což je zobrazeno na obr. 41, kde černý obdélník v levém spodním rohu každého snímku představuje jednotku 50  $\mu\text{m}$ .



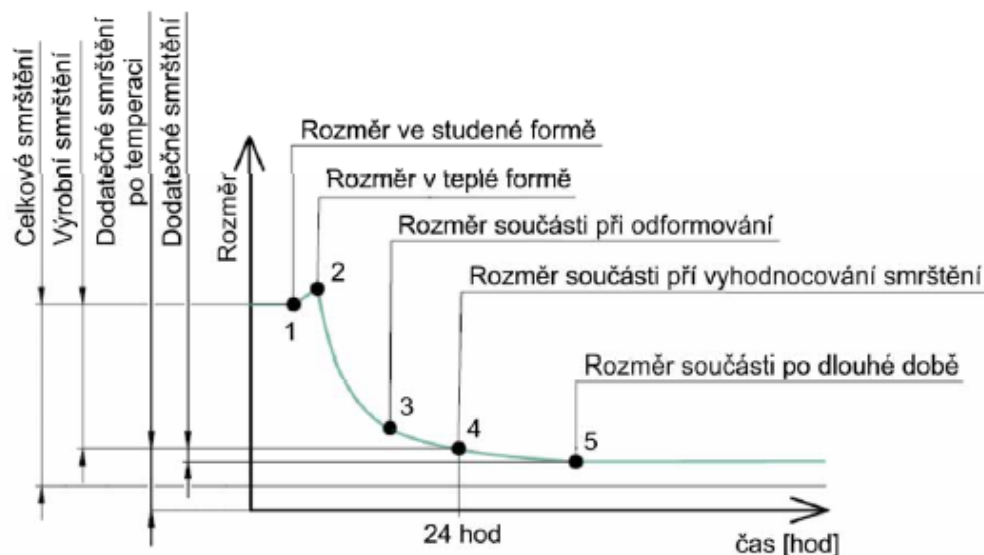
Obr. 41 Různě stupně krystalinity pozorované mikroskopem [15]

- **Pnutí** je jev vznikající v důsledku nerovnoměrných objemových změn a teplotně tlakových procesů, který vždy provází proces vstřikování plastů a není možné mu zabránit. Snahou tedy je jeho velikost vhodnou volbou výrobních parametrů zmenšit na nejmenší možnou hodnotu, jelikož je pnutí potenciálním zdrojem deformací, trhlin, nebo prasklin plastového dílu. Při namáhání plastového dílce vnějším zatížením se sčítají účinky vnějšího namáhání a vnitřního pnutí, což



Obr. 42 Využití fotoelasticimetrie při stanovení pnutí [15]

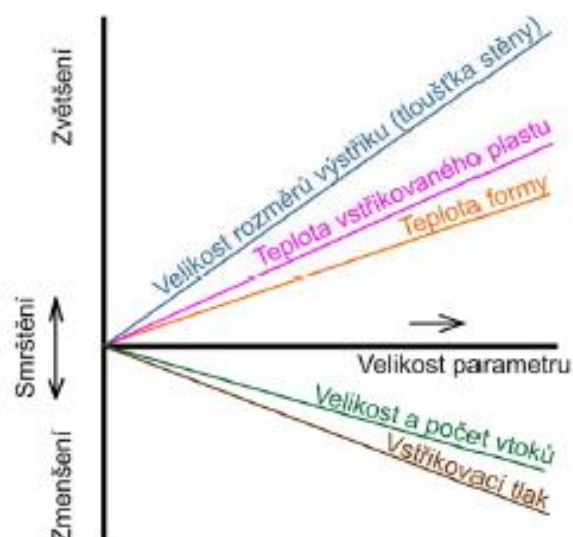
může vést k porušení tělesa při výrazně menším vnějším zatížení, než jaké odpovídá materiálovým charakteristikám materiálu, z něhož je vyroben. Opačným jevem, který eliminuje pnutí, je relaxace, ke které dochází za zvýšené teploty. Proto je u plastových dílců pro snížení pnutí prováděn ohřev, nazývaný dodatečná temperace. Rozlišujeme tři typy pnutí. Prvním z nich je ochlazovací pnutí, které vzniká vlivem nerovnoměrného ochlazování různých částí výstřiku. Dochází tedy ke vzniku pnutí mezi jádrem stěny výstřiku, které je pomalu ochlazované a má tendenci se smrštít, ale brání mu v tom ztuhlá povrchová vrstva taveniny, která je rychle ochlazována s malým smrštěním. S rostoucí teplotou formy se ochlazovací pnutí snižuje. Druhým typem je orientační pnutí, ke kterému dochází vlivem nestejné tepelné roztažnosti různě orientovaných částí výstřiku. V oblastech vysokého stupně orientace působí tahově a ve zbývajících oblastech tlakově. Se zvyšující se teplotou formy a taveniny jeho účinky klesají. Posledním případem je krystalizační pnutí, vzniklé rozdílným smršťováním oblastí s různým krystalickým podílem a je typické pouze pro semikrystalické plasty. Všechna uvedená pnutí se navzájem sčítají, výsledná napjatost v dílci je velmi komplikovaným jevem, který může být



Obr. 43 Časový průběh vzniku smrštění plastu [41]

popsán například pomocí izochromátů, produktů fotoelasticimetrie (obr. 42).

- **Smrštění** je nežádoucí objemová změna plastového výstřiku, vznikající v důsledku jeho chlazení bez současného působení tlaku. Konkrétní složky procesu smrštění v závislosti na čase jsou zobrazeny na obr. 43 a je z nich patrný princip pozvolného snižování změny rozměrů v čase, při nejvyšší hodnotě změny rozměru v teplé formě krátce po vstřikování. Smrštění dílce se standardně měří po 24 hodinách od jeho výroby, je prováděno při normovaných podmínkách (teplota 23°C a relativní vlhkost vzduchu 50%) a nazývá se výrobní smrštění. Jelikož rozměry výstřiku nejsou po 24 hodinách plně stabilizované vlivem relaxace napětí a sekundární krystalizace plastů, jsou tyto dodatečné změny nazývány dodatečné



Obr. 44 Vliv parametrů vstřikování na smrštění [41]

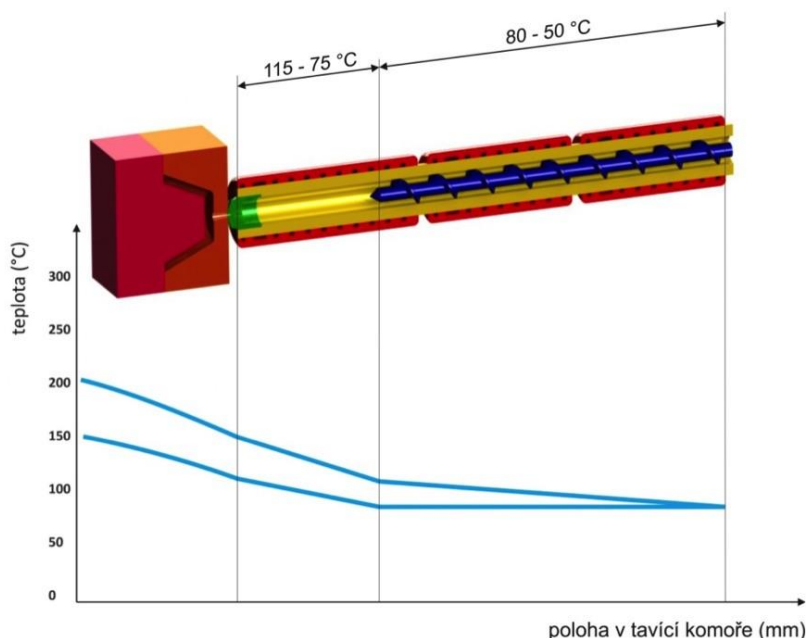


smrštění. Dodatečné smrštění uvažujeme až do 168 hodin po odformování, během této doby je dílec uložen v normalizovaném prostředí. Tyto dvě hodnoty smrštění navzájem není možné sčítat, jelikož u každé byl pro výpočet použit jiný rozměr. Nejvýraznější vliv na smrštění mají z vlastností plastů teplota a tlak, kterému je výstřik vystaven. Zvýšení tlaku má za následek snížení smrštění výstřiku. Jelikož s klesající vzdáleností od vtoku klesá tlak v dutině formy, je smrštění s rostoucí vzdáleností od vtoku vyšší. Zvýšení vstřikovací rychlosti má pak vliv na orientaci makromolekul, což se projeví smrštěním v příčném a podélném směru. Přehled vlivů jednotlivých výrobních parametrů názorně popisuje obr 44. Řádově velikost smrštění dosahuje 0,3 až 0,7% u amorfních plastů do 4% u semikrystalických plastů.

#### 2.2.4 Aplikace vstřikovacího procesu [22],[40],[4],[23]

V závislosti na materiálu použitým pro technologii vstřikování rozlišujeme výrazné rozdíly v průběhu vstřikovacího cyklu v porovnání se vstřikováním termoplastů.

- **Vstřikování reaktoplastů** přináší hlavní rozdíl oproti technologii vstřikování termoplastů v rozdílném smrštění, rozdílné závislosti viskozity na teplotě a v nahrazení doby chlazení dobou vytvrzování, při níž vzniká zesítená struktura. Vstřikovací forma je namísto chlazení vyhřívána na vytvrzovací teplotu, která se v závislosti na typu reaktoplastu pohybuje mezi 150 až 200 °C viz obr 45. Doba vstřikovacího cyklu je dána dobou vytvrzení a zvyšuje se s rostoucí tekutostí taveniny. Technologie vstřikování reaktoplastů je závislá na kvalitním odvzdušnění formy, jelikož plyny vznikající při ohřevu reaktoplastů mohou způsobit defekty na hotovém dílci. Pro odvzdušňování jsou používány odvzdušňovací kanálky a metoda částečného otevření formy během fáze vstřiku. Průběh vstřikovacího cyklu začíná vstříknutím až 95% objemu taveniny reaktoplastu, pokračuje snížením uzavírací síly, následuje odvzdušnění, opětovné zvýšení uzavírací síly a doplnění objemu. Liší se také konstrukce šneku, který má kvůli zamezení předčasnému vytvrzování reaktoplastu potlačenou kompresní část.

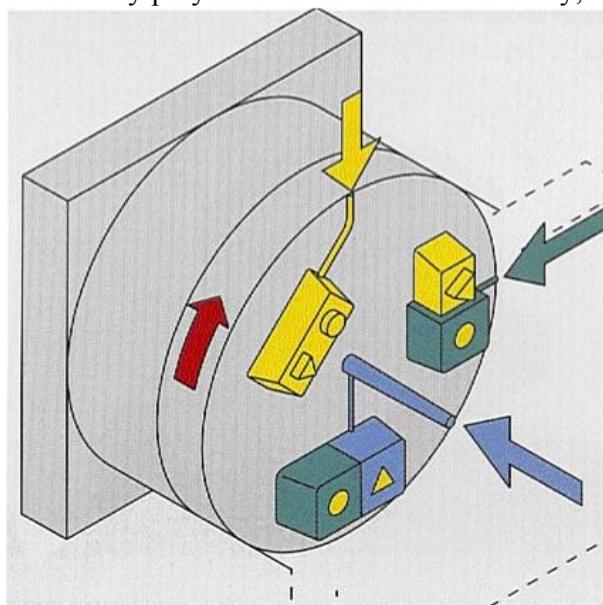


Obr. 45 Průběh teploty ve válci při vstřikování reaktoplastů [23]

- **Vstřikování silikonů** je oproti vstřikování termoplastů a reaktoplastů nejvýrazněji charakteristické rozdílem v tekutosti vstupního materiálu. Silikon je standardně dodáván v barelech různých objemů (nejčastěji 100l barely), z nichž je materiál veden pístem přímo do

plastikační jednotky. Plastikace silikonů probíhá za velmi nízkých teplot, mezi 20 až 30 °C. Doba chlazení je zde nahrazena dobou vulkanizace, při které dochází k zesílení struktury. Vstřikovací forma je temperována na teplotu vulkanizace, která se pohybuje v rozsahu 160 až 220 °C. Šnek je proveden podobně jako při vstřikování reaktoplastů a má spíše pouze funkci pístu.

- **Vícekomponentní vstřikování** je speciálním druhem procesu vstřikování, při kterém jsou vstřikovány dva, nebo více materiálů, nebo barev jednoho druhu plastu. Vstřikované materiály jsou navzájem spojeny adhezními silami, nebo zastříknutím tvarové geometrie spoje. Tab. zobrazuje přehled vhodnosti jednotlivých materiálů pro vícekomponentní vstřikování, vzhledem k úrovni jejich adhezní soudržnosti. Základním rozdílem oproti klasickému procesu vstřikování je množství vstřikovacích jednotek, které mají individuální technologické parametry, dávkování, vytápění a jejich množství je závislé na počtu a druhu komponent výstřiku. Nejrozšířenějším způsobem je dvoukomponentní vstřikování, při kterém je do první tvarové dutiny vstříknut první komponent a zároveň druhý polymer vstříknut do druhé dutiny, odkud je následně vyhozen a dojde k otočení polotovaru vzniklého v první tvarové dutině na toto místo, kde je dále vstříknut druhý komponent a mezi tím dojde opět ke vstříknutí první komponenty do první tvarové dutiny. Otáčení probíhá nejčastěji o 180° a vstřikovací jednotky bývají uspořádány do tvaru písmene L, nebo V. Obdobně probíhají procesy tří a čtyřkomponentního vstřikování, s tím, že úhly otočení formy s tvarovými dutinami jsou samozřejmě menší a počet vstřikovacích jednotek je vyšší. Překládání výstřiků mezi tvarovými dutinami může být řešeno pomocí rotace poloviny formy kolem horizontální, nebo vertikální osy, rotací části vstřikovací formy kolem horizontální osy, použitím pohyblivého tvárníku, nebo robotu.

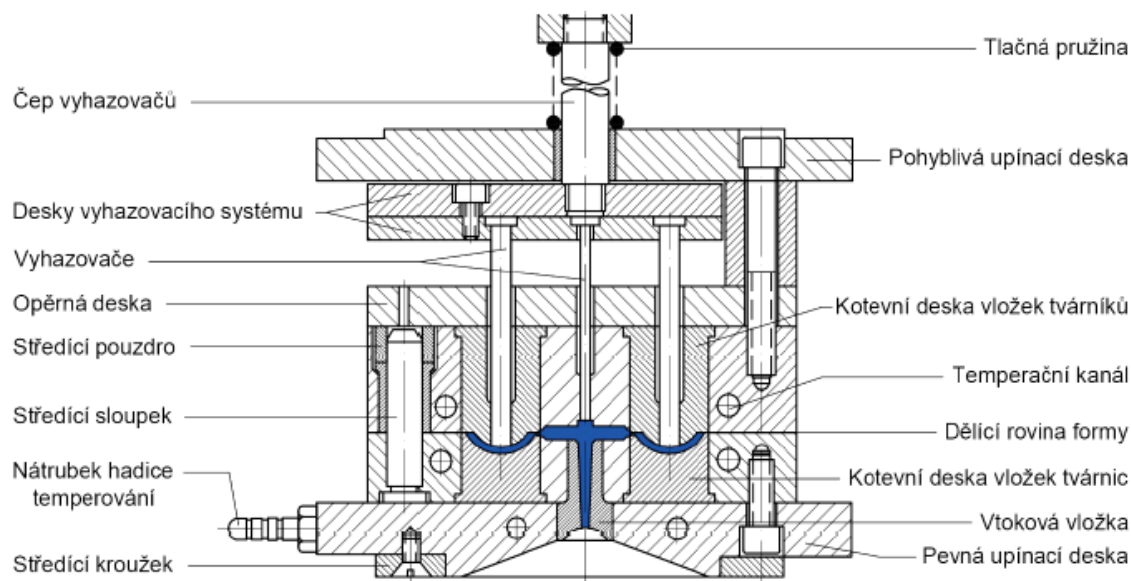


Obr. 46 Princip vícekomponentního vstřikování [23]

### 2.3 Vstřikovací forma [22],[40],[4],[15],[22],[47],[23]

Vstřikovací forma je nástroj používaný technologií vstřikování plastů, který dává tavenině plastu výsledný tvar a rozměr. Jedná se o výměnný nástroj, kterých může být na vstřikovacím stroji používáno více, pokud se jedná o formy podobného typu a hmotnosti. Vstřikování plastů je vysoce přesný proces a kvůli tomu jsou na kvalitu formy kladeny velmi vysoké požadavky. Forma musí odolávat cyklickému působení vstřikovacího tlaku (až 200MPa) za zvýšené teploty (cca 350°C). Jednotlivé komponenty formy (obr.47) jsou většinou výměnné a jsou vhodně poskládané ve vstřikovacím stroji tak, aby daly plastovému dílci požadovaný tvar. Mezi základní části forem patří tvarová dutina, tvořená tvárníkem a matricí, vtoková soustava, temperační systém, systém vyhazování a doplňkové prvky, jako je vedení a upevňující elementy. Tvarová dutina je zpravidla větší, než objem vyráběného dílce, jelikož je nutné počítat se smrštěním výstřiku. Významnou charakteristikou vstřikovací formy je její násobnost, což je hodnota, která vyjadřuje počet tvarových dutin formy. Vyšší násobnost může pomoci zvýšit produktivitu za cenu větší technologické náročnosti vstřikovací formy. Nejčastěji jsou formy aplikovány pro vstřikování termoplastů a podle počtu vyráběných plastových dílců rozlišujeme tři základní skupiny forem. Dělíme je na prototypové formy, používané jako předběžný vývojový krok pro zjišťování charakteristik materiálu s cíleným počtem výroby zhruba 1000 dílců. Dále na produkční formy, vyrobené z méně nákladných materiálů, schopné produkce plastových dílců s požadovanou

výkonností, které jsou dimenzovány na zhruba 10 000 dílců. Nejvyšší jsou pak vysoce produkční formy, které jsou sestaveny z vyměnitelných komponent vyšší kvality, povrchově upravené a schopné vyrábět v řádu milionů kusů.

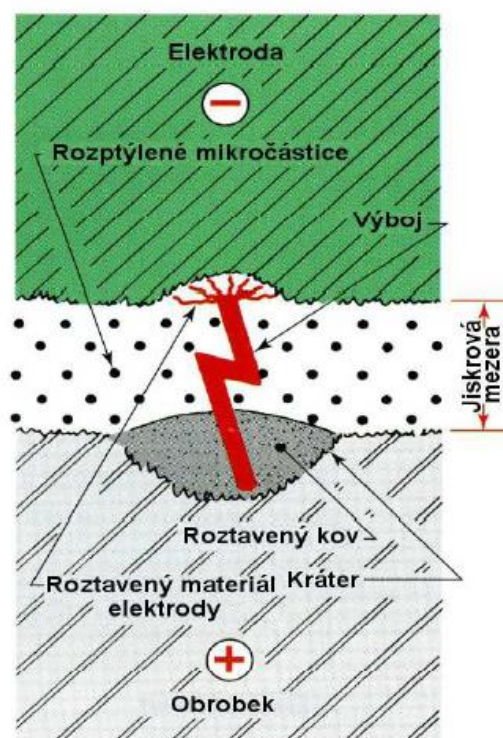


Obr. 47 Řez vstřikovací formou [23]

### 2.3.1 Materiál vstřikovací formy a její výroba [7],[49],[50],[24]

Jednotlivé komponenty vstřikovací formy mají různé funkce a jsou vystaveny různému typu namáhání, což musí být zohledněno volbou materiálu. Pro výrobu vstřikovacích forem jsou používány převážně nástrojové oceli a slitiny kovů, jako jsou beryliové bronzy, kobaltové a niklové slitiny. Tvrdost zušlechťených částí formy se pohybuje mezi 50 a 60HRC. Pro tvárník a tvarovou dutinu celkově jsou nejčastěji používány cementované a kalené nástrojové oceli, které se vyznačují houževnatým jádrem, vysokou tvrdostí a odolností vůči opotřebení. Používají se zde také antikorozi oceli, pro zpracování chemicky reaktivních plastů. Pro výrazně namáhané desky formy jsou používány konstrukční i nástrojové cementační oceli, pro méně namáhané desky pak konstrukční oceli třídy 11. Vodící prvky jsou většinou vyráběny z cementačních ocelí, vyhazovače z nástrojových, nitridovaných ocelí. Vtokové vložky se nejčastěji vyrábí z kalitelných nástrojových ocelí. Výběr oceli závisí především na typu vstřikovaného termoplastu, způsobu výroby tvarové dutiny a zamýšlenému počtu vyprodukovaných plastových dílců. Ze slitin jsou využívány slitiny hliníku pro prototypové formy, slitiny mědi a beryliové bronzy jsou používány kvůli odolnosti proti opotřebení v mechanismech formy a slitiny titanu slouží pro výrobu mechanicky namáhaných tepelně izolačních elementů horkých vtokových soustav, díky jejich nízké teplotní vodivosti.

Formy jsou vyráběny kombinací technologií tržkového a elektroerozivního obrábění. Hrubovací operace jsou provedeny frézováním, například pomocí vysokorychlostního obrábění (HSC). Jedná se tedy o technologickou metodu odebrání materiálu ve formě třísky řezným nástrojem a používají se k němu



Obr. 48 Princip elektroerozivního hloubení forem [19]



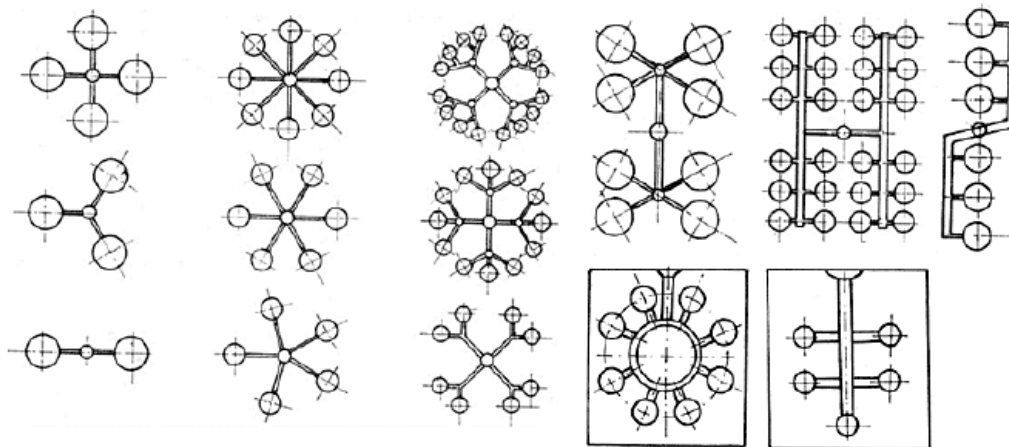
moderní víceosá obráběcí centra. Dokončovací operace a obrábění oblastí formy, kde se vyskytují tzv. ostré hrany, neboli místa, kam se vlivem geometrie formy nedostane fréza, jsou obráběny pomocí elektroerozivního obrábění. Jedná se o nekonvenční způsob obrábění, založený na principu odtavování a odpařování pomocí elektrických výbojů (obr.48). Velkou výhodou této technologie je fakt, že není ovlivněna mechanickou pevností a tvrdostí materiálu, jelikož je elektroerozivní obrábění chemickým procesem. Nutnou podmínkou je, aby byl obráběný materiál vodivý. Samotné obrábění probíhá mezi anodou (obrobkem) a katodou (nástrojem) ponořenými v dielektrické kapalině, oddělenými tzv. jiskrovou mezerou. Impulsními elektrickými výboji je pak odebrán materiál z obrobku při teplotách 4000 až 10000°C podle dané aplikace. Existují varianty řezání (pomocí drátu) a hloubení, pro které je nutné vyrobit pomocí technologie frézování grafitovou elektrodu, která má negativní tvar vůči obráběnému tvaru a je možné ji použít pouze jednou na tuto operaci. Výroba elektrod zvyšuje náklady celého procesu, ale umožňuje dosahovat pomocí hloubení elektrodou výborné kvality povrchu formy.

Obecně je u výroby tvarových dutin forem dosahováno přesností IT6 až IT12 a drsnost  $R_a$  se pohybuje od 0,05 u vysoce přesných ploch po 1,6 u méně významných dosedacích ploch. Rozlišujeme následující typy provedení povrchu formy.

- **Matné** provedení je nejméně náročné na výrobu a umožňuje překrýt některé nedokonalosti výroby formy a vstřikovacího procesu, jako jsou např. studené spoje a vtokové čáry. Jedná se o výchozí plochu vzniklou po elektroerozivním obrábění
- **Lesklé** provedení vyžaduje nákladné a náročné opracování dílů, které je ekonomicky náročnější a zvýrazní výrobní nedostatky formy i výstřiku.
- **Sezonové** provedení patří mezi speciální úpravy, které vyžaduje kvalitní opracování výrobky a vyrábí se elektrochemicky.

### 2.3.2 Vtokové systémy forem [22],[40],[4],[15],[22],[7],[23],[24]

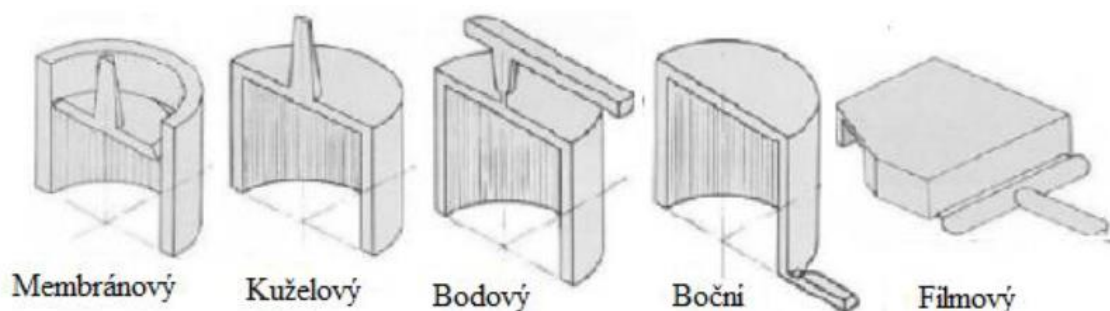
Pomocí vtokového systému je dopravována tavenina ze vstřikovací jednotky do tvarové dutiny formy, což je realizováno systémem kanálů a ústí vtoku. Volba vtokového systému musí zajistit rovnoměrné plnění tvarové dutiny taveninou v nejkratším možném čase za působení co nejmenšího odporu tečení taveniny. Skládá se z hlavního rozváděcího kanálu, systému menších rozváděcích kanálků a ústí vtoku, které je spojeno se vstřikovací tryskou. Rovnoměrnost plnění má významný vliv na přesnost výstřiku. Je také nutné zajistit snadné oddělení vtokového zbytku, který je odpadem technologie. Jednotlivé konstrukční řešení vtokových systémů je na obr., jedná se o základní řešení uspořádání vtokové soustavy v závislosti na složitosti dílce, a ekonomičnosti výroby. Vtok by měl být vždy umístěn takovým způsobem, aby dráha proudění taveniny byla co nejkratší a tím pádem vznikaly co nejmenší teplotní ztráty. Nevhodné umístění má vliv na orientaci makromolekul, vznik studených spojů, nerovnoměrnost krystalizace a zhoršení kvality povrchu. Vtokové systémy dále rozdělujeme na studené a horké vtokové soustavy.



Obr. 49 Základní druhy geometrického uspořádání rozváděcích kanálků [50]

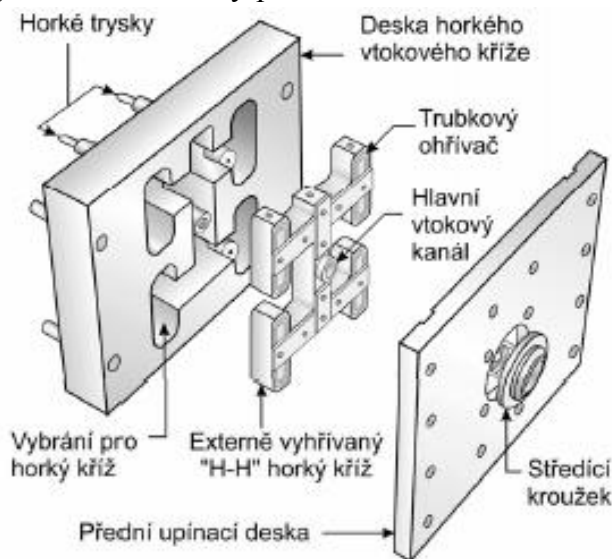


- **Studený vtokový systém** je charakteristický tuhnutím taveniny na stěnách formy, která vytváří tepelnou izolaci vstřikovanému proudu taveniny, který je stále v tekutém stavu. Jelikož je cílem přemístit pomocí vtoku co nejvíce taveniny v nejkratším čase, jeví se jako nejvýhodnější průřez vtoku kruh. Skládá se z hlavního vtoku, rozvodného kanálu, jímky k zachycení nečistot a ústí do výstřiku. Použití studených vtoků je jednoduché a poměrně nenáročné na údržbu. Možnou nevýhodou je poměrně vysoké procento odpadu, což může být v některých případech neekonomické, ale většinou je možné tento odpad recyklovat ve formě regenerátu. Použití studeného vtoku je vázáno na jeho umístění do dělicí roviny formy, což není vždy možné. Typické příklady studených vtokových ústí jsou zobrazeny na obr.50. Pro eliminaci odpadu a zkrácení vstřikovacího cyklu je snaha používat tzv. horké vtokové soustavy.



Obr. 50 Základní druhy konstrukčního řešení studených vtoků [41]

- **Horká vtoková soustava** prodlužuje plastikační komoru vstřikovacího stroje, kudy je tavenina vedena do tvarových dutin formy přes systém tepelně kontrolovaných kanálků a vtokových ústí. Během průchodu horkou vtokovou soustavou je všechen plast udržován v tekutém stavu a začíná tuhnut teprve, až dorazí do dutiny formy, což přispívá k udržení stejnoměrné viskozity po celou dobu toku. Zavedení horkých vtoků se projeví zvýšením

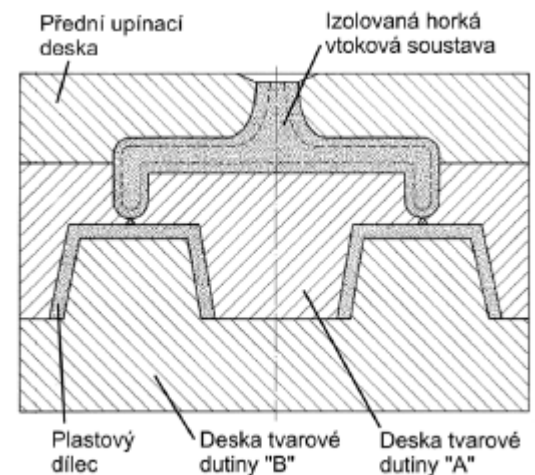


Obr. 51 Schéma horkého vtoku [16]

plastového dílce na jednu horkou trysku vzniká část studeného vtoku. Při jedné trysce vstřikující jeden dílec dochází k tzv. jednobodovému vstřikování a při více tryskách na jeden dílec tzv. vícebodové vstřikování. Horké vtokové soustavy dále dělíme na izolované, vnitřně vyhříváné a externě vyhříváné.

kvality výstřiku, snížením času cyklu a úsporou materiálu, jelikož nevzniká tuhá vtoková soustava, kterou by bylo třeba oddělit. Je však nutné vybavit vstřikovací formu zařízením pro regulaci teploty, což jsou ohříváče řízené termočlánky. Největší uplatnění nachází horké vtokové systémy při vstřikování do vícenásobných forem. Hlavním rozdílem oproti formám se studeným vtokem je tzv. horká polovina formy, ve které je plast udržován ve stavu taveniny o stejné teplotě, se kterou byl vstřikován. Vstřikovací formy mohou obsahovat různý počet tzv. horkých trysek. Při vstřikování více než jednoho

- **Izolovaná horká vtoková soustava** je levné řešení horké vtokové soustavy vhodné pro plastové materiály citlivé na degradaci vlivem tepla, jelikož odbourává vysoké rozdíly teplot mezi taveninou a mnohem chladnější formou. Vlivem průměru kanálků zůstává tavenina termoplastu v jádře vtoku dostatečně tekutá a při dodržení dostatečně rychlého cyklu vstřikování je možné ji použít opakovaně. Pokud tavenina ztuhne, je nutné ji odstranit, což může trvat do 10 minut.
- **Vnitřně vyhřívaná vtoková soustava** je navíc tvořena topnými vložkami ve všech kanálcích této soustavy a tavenina plastu proudící kolem těchto vložek je udržována v tekuté formě pomocí kazetových ohřivačů a termočlánků obsažených ve vložkách. Nedochází přitom ke ztrátám tepla do desek formy a stačí dodávat nižší množství tepla, než u externě vyhřívané soustavy. Pokud dojde ke ztuhnutí vrstvy plastu ve vtoku, slouží ostatní tavenině jako tepelná izolace, je však nepřipustné, aby docházelo k opětovnému tavení plastu ve vtoku, jelikož by to mohlo vést k jeho degradaci. Může k tomu docházet v tzv. stagnačních zónách, což jsou místa, kde má tavenina po určitou dobu nulovou rychlost toku. Cena vnitřně vyhřívaného vtokového systému je ve srovnání s externě vyhřívaným systémem nižší a jeho čištění vyžaduje demontáž formy spojenou s výměnou tlakových těsnění vytápěných vložek, což provází riziko poškození.



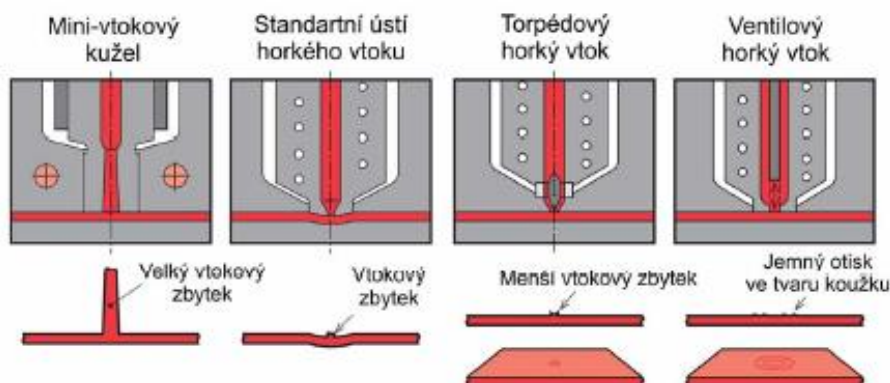
Obr. 52 Řez izolovaným horkým vtokem [16]

- **Externě vyhřívaná vtoková soustava** je tvořena vtokovými kanálky s hladkým povrchem bez stagnačních oblastí, což vede k vylepšení mechanických vlastností výstřiků. Je využíváno mnoho systémů pro ohřev, mezi které patří např. kazetové a trubkové ohřivače, ohřivače ve tvaru cívek, nebo vložek. Tepelné systémy musí zajistit odpovídající přenos tepla při náběhu na pracovní teplotu v dostatečně krátkém čase a jsou navrhovány k přenosu vysokých vstřikovacích tlaků, dosahujících až 200 MPa. Jednoduchá horká vtoková soustava tvořená jednou tryskou obsahuje horký vtokový kužel a horké vtokové trysky, příklad této trysky je popsán na obr 53. Takových trysek může forma obsahovat více, což se projeví v její konstrukci přidáním vyhřívaného rozváděcího bloku, tzv. horkého kříže. Mezi hlavní výhody použití tohoto řešení vtoku patří redukce dávky vstřikovaného plastu, jelikož nevzniká tuhá vtoková soustava, odpadá starost o odpad vzniklý vtokovou soustavou a jeho vyhazování a také je redukováno zbytkové napětí ve výstřiku, jelikož ve vtokové soustavě nedochází k výrazným poklesům teploty a tlaku. Za nevýhody je možné považovat konstrukční a ekonomickou náročnost a riziko degradace plastů vlivem teploty ohřevu.



Obr. 53 Externě vyhřívaná horká tryska [16]

Výrazný vliv na vlastnosti výstřiku má vybraný typ trysky pro ústí horkého vtoku, který je ovlivněn především složitostí plastového dílce, tloušťkou stěn, délkou tokových drah a vlivem smykového napětí při toku taveniny. Tryska musí mít dostatečnou velikost vzhledem k objemu vstříkované dávky a viskozitě dané taveniny. V místě vyústění horkého vtoku je vhodné provést na výstřiku zahloubení, aby případný vtokový zbytek nevystupoval přes úroveň výstřiku. Konkrétní příklady konstrukčního řešení vtokových ústí jsou na obr. 54.

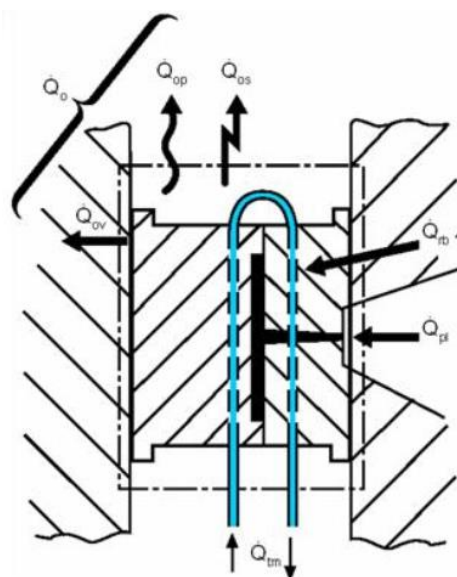


Obr. 54 Ilustrace zanechaných stop po horkém vtoku [16]

### 2.3.3 Temperační systém formy [22],[40],[4],[15],[7],[23],[24]

Pojem temperace zahrnuje ohřev, nebo ochlazování pomocí temperačního média. Temperace tedy zajišťuje ohřev formy na požadovanou teplotu, udržení rovnoměrné teploty požadované hodnoty po celém povrchu tvarové dutiny formy a odvod tepla pomocí temperačního média, přiváděného do temperační soustavy formy. Tato soustava je tvořena sérií kanálků kolem tvarové dutiny v její dostatečné blízkosti. Eliminací nerovnoměrného rozložení teplot je snížen vliv smrštění plastu a riziko snížení jeho jakosti. U některých plastů, jako např. PC je nutné formu naopak ohřívat, jelikož ke zpracování vyžaduje teplotu 120°C. Tento proces je schematicky znázorněn na obr. 55.

Většina tepla vznikajícího ve formě během výroby je odváděna temperačním systémem, zbytek je odváděn upínacími plochami stroje, okolním vzduchem a vyzářením do okolí. Rozmístění temperačních kanálků, včetně teploty a rychlosti proudění temperačního média jsou proto voleny tak, aby v jednotlivých částech formy byl co nejmenší rozdíl teplot, jelikož různé části formy jsou různě tepelně namáhány. Temperační systém může být umístěn v pohyblivé i pevné části formy. Množství tepla procházející mezi stěnou formy a temperačním kanálem závisí na tepelné vodivosti materiálu, tloušťce stěny a rozdílu teplot. Během vstřikovacího cyklu by měla platit rovnost mezi velikostí tepla přivedeného do formy taveninou a tepla odvedeného temperačním systémem (obr. 56), včetně tepla odvedeného dílčími tepelně namáhanými částmi formy. Rozlišujeme aktivní a pasivní temperační prostředky.

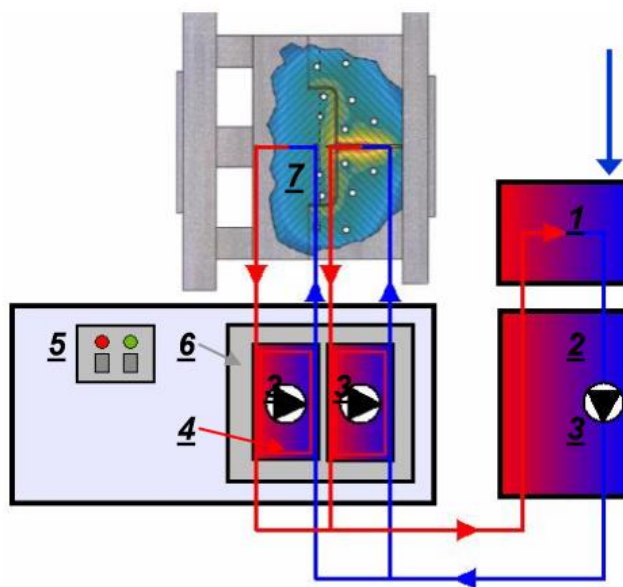


Obr. 55 Princip odvodu tepla z formy [7]



- **Aktivní temperační prostředky** jsou zdrojem teploty přímo ve formě, kde vedou nebo odvádí teplo dle požadavků na teplotu formy. Patří mezi ně voda, olej, vzduch, kapalně  $\text{CO}_2$  a elektrické tepelné zdroje.
- **Pasivními temperačními prostředky**, které ovlivňují teplotu formy svými fyzikálními vlastnostmi, jsou vysoce tepelně vodivé materiály, které se používají ve formě vložek a tepelné trubice.

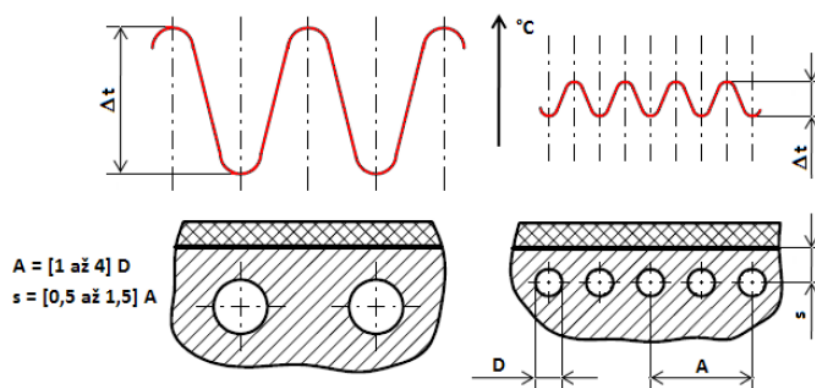
Nejrozšířenějším způsobem temperování formy je použití vody jako temperačního média. Průtoková rychlost vody se pohybuje mezi 0,5 až 4 m/s. Mezi výhody použití vody patří především lepší tepelné vlastnosti, než má olej, ekologická nezávadnost, ekonomická dostupnost, nehořlavost a nízká viskozita. Nevýhodou je však ztráta chemicky čisté vody při teplotě nad  $60^\circ\text{C}$  v podobě vodní páry, která tvoří v systému usazeniny. Její jakost je také závislá na geologických podmínkách, obsažené látky typu Ca a Mg vedou ke vzniku vodního kamene, rozpuštěné plyny  $\text{N}_2$  a  $\text{O}_2$  vedou ke korozi temperačního systému. Již při 1 mm tloušťky vodního kamene dojde ke snížení účinnosti temperačního systému až o 10%, je proto potřeba přidávat do oběhu odvápnovací prostředky. Mezi nejznámější patří REM 93, což je organická kyselina s anorganickým aktivátorem, jehož 1 kg uvolní cca 0,5 kg vápenných usazenin. Aby se zamezilo rozdílnému chladicímu efektu a odvodu tepla na jedné straně jádra, nebo dutiny vůči druhé straně, jsou v systému využívány přepážky, které zaručují optimální cirkulaci kapaliny. Nejjednodušším řešením je plochá přepážka, která je jednoduchým a levným řešením, ale nemusí vždy vést k ideálním výsledkům chlazení. Dokonalejší



Obr. 56 Schéma temperačního systému formy [7]

spirálové přepážky tvoří vysoce homogenní teplotní pole okolo dutiny jádra a jsou provedeny s jednou, nebo dvěma spirálami. Alternativou je trubičková přepážka. Trubicí proudí kapalina do vrcholu dutiny a mezi vnější stěnou trubice a vnitřní stěnou dutiny se vrací zpět.

Rozměry a umístění temperačních kanálů jsou voleny tak, aby vzdálenost kanálů od tvarové dutiny nesnižovala tuhost formy. Jelikož pro přestup tepla slouží povrch kanálů, je lepší variantou použít větší množství kanálů o menším průměru, což zajistí kolísání teploty na obr. 57. Velikost průřezu kanálu je volena v závislosti na velikosti výstřiku, druhu vstřikovaného plastu a velikosti formy.

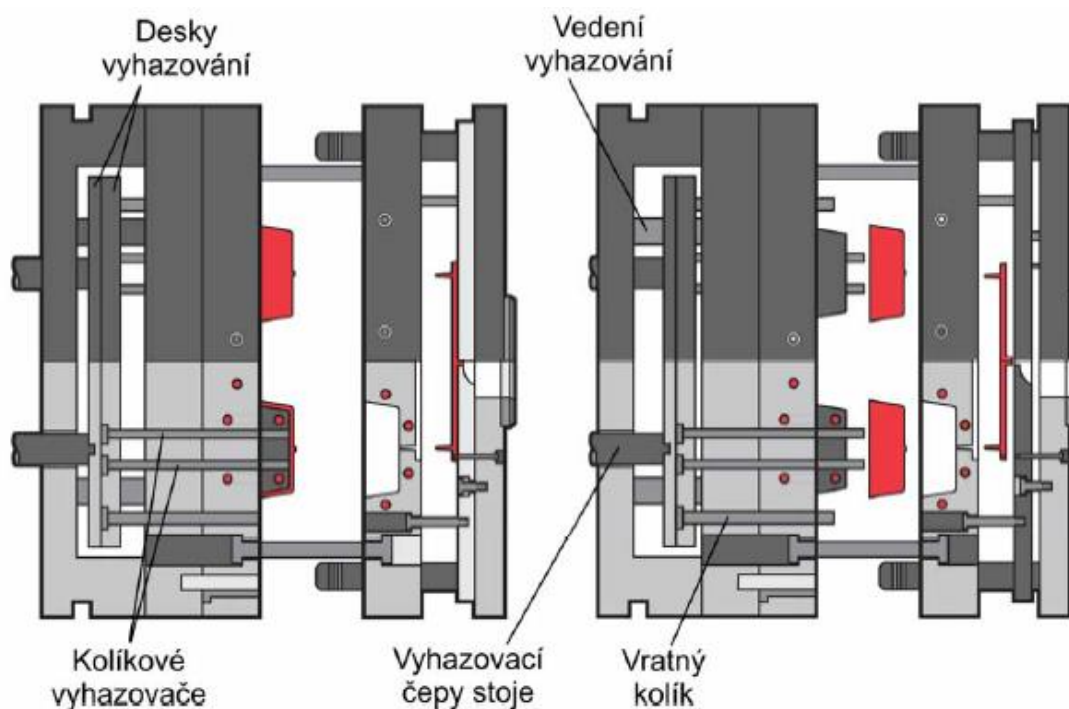


Obr. 57 Vliv umístění temperačních kanálků na kolísání teploty formy [7]

### 2.3.4 Vyhazovací systém formy [22],[40],[4],[15],[7],[23],[24]

Vyhazovací systém slouží k vyhození ztuhlých plastových dílců z formy, což musí být vzhledem k ploše dílce, která je v kontaktu s vyhazovacím mechanismem rovnoměrný proces, jinak hrozí nebezpečí zborcení dílce. Vyhazovací mechanismus je obvykle tvořen dvěma deskami se samostatným vedením, které svírají hlavy kolíkových vyhazovačů. Čela vyhazovačů v uzavřené formě kopírují geometrii tvarové dutiny. Systém vracení vyhazovačů vratnými kolíky musí být schopný funkce s dostatečným předstihem a přesností, aby nedošlo k jejich kolizi s protější stranou tvarové dutiny formy, nebo naopak nedosednutí. Rozlišujeme několik variant řešení vyhazovacího systému, které jsou ovládány pneumatickými, nebo hydraulickými pohony.

- **Vyhazovací kolíky** jsou nejlevnější a nejjednodušší možností zajištění vyhazování výstřiku (obr. 58). Kolíky mají většinou kruhový tvar a jsou uloženy kolmo k dělicí rovině, speciálním případem jsou šikmé kolíky, které jsou k dělicí rovině uloženy pod úhlem. Vyhazovací systém musí obsahovat dostatečné množství kolíků, které rovnoměrně rozdělí tlak na součást při vyhazování a zabrání tak poškození součásti kolíky. Existuje mnoho druhů průřezů vyhazovacích kolíků, od kruhových a obdélníkových průřezů, po speciální tvarové. Ne vždy je ovšem použití kolíků možné, např. když je potřeba vyhodit tenkostěnnou rotační součást, která po odformování drží na tvárníku, tam je nutné použít stírací desky.



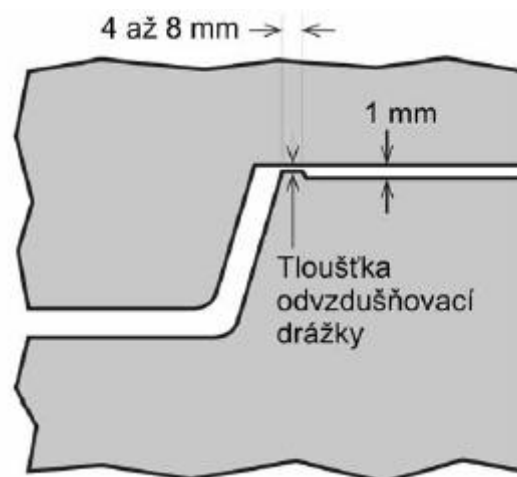
Obr.58 Schematický řez formou zaměřený na kolíkový vyhazovací systém [7]

- **Stírací desky** mají větší vyhazovací plochu než kolíky a stahují výstřik z tvárníku po celém jeho obvodu. Při použití stírací desky jsou stopy po vyhazování mnohem méně patrné než u kolíků, tento typ stírání se typicky používá pro tenkostěnné součásti náchylné na deformace.
- **Pneumatické vyhazovací systémy** jsou užitečné pro vyhazování tenkostěnných výstřiků, u kterých je požadavek na odvzdušnění při vyhazování. Proces pneumatického vyhazování je rovnoměrný a nezanechává žádné stopy po vyhazování. Stlačený vzduch je do dutiny formy přiváděn jehlovým, nebo talířovým ventilem. Jeho otevření je realizováno pomocí tlaku vzduchu, zavírání pomocí pružiny.



### 2.3.5 Odvzdušnění formy [22],[40],[4],[7]

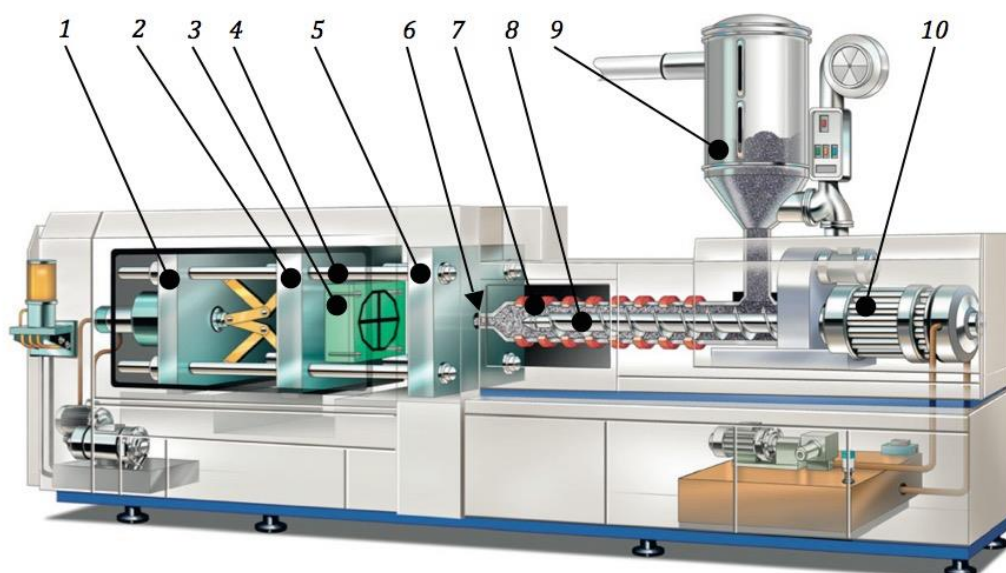
Odvzdušnění tvarové dutiny je nutné pro zbavení tvarové dutiny uzavřeného vzduchu, což je velmi důležité pro přesnou kontrolu vstřikovaného objemu taveniny a pro kontrolu kvality vstřikování. Samotné odvzdušnění je řešeno pomocí zavedení drážek do dělicí roviny (obr.59). Alternativně mohou být odvzdušňovací drážky umístěny např. mezi tvárník a stírací desku, pokud to geometrie tvarové dutiny vyžaduje. Velikost těchto drážek se pohybuje mezi 0,02 až 0,04 mm, což umožní uvolnění vzduchu, ale ne taveniny. Pro semikrystalické plasty se zpravidla používá nižší z těchto hodnot, pro amorfní pak ta vyšší. Odvzdušňovací drážky jsou umísťovány na koncích toků materiálových drah. Jejich špatné umístění může vést k nekompletnímu vyplnění tvarové dutiny, vzniků spojů nízké pevnosti, nerovnoměrnému smrštění, zborcení dílce a potřebě vyššího vstřikovacího tlaku k vyplnění tvarové dutiny.



Obr. 59 Řez odvzdušňovací drážkou formy [7]

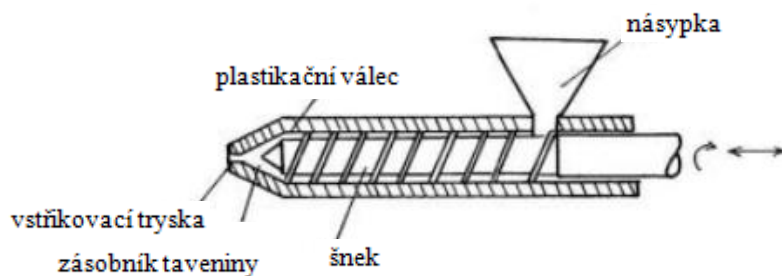
### 2.4 Stroje pro vstřikování plastů [22],[40],[4],[22],[7],[23]

Proces vstřikování plastů probíhá na plně, nebo částečně automatizovaných strojích. Vlivem automatizace je dosažena vysoká produktivita práce a vzhledem k vysoké pořizovací ceně takového stroje je optimální jeho maximální využití v hromadné, nebo velkosériové výrobě. Hlavními částmi vstřikovacího stroje jsou vstřikovací a plastikační jednotka, uzavírací jednotka a řídicí systém. Podle vzájemné polohy osy vstřikovací jednotky a uzavírací jednotky rozlišujeme vodorovné a svislé uspořádání stroje. Automatizaci výroby pomáhá nasazení robotických manipulátorů odebírajících výstřiky ze stroje.



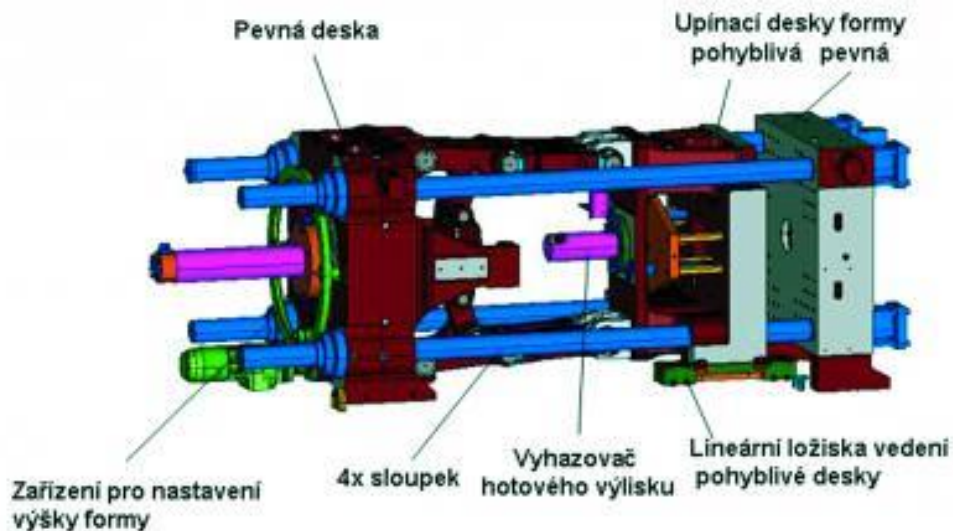
Obr. 60 Popis stroje pro vstřikování plastů: 1-Uzavírací jednotka, 2-Pohyblivá upínací deska vstřikolisu, 3-pohyblivá část formy, 4-vodící sloupky vstřikolisu, 5-pevná upínací deska vstřikolisu, 6-čelo vstřikovací trysky, 7-tavící komora, 8- šnek, 9-násypka pro plastový polotovar, 10 – pohonná jednotka šneku [23]

- **Vstřikovací jednotka** plní dva hlavní úkoly – zajišťuje přeměnu granulátu plastu na teplotně a materiálově homogenní taveninu a následně ji dopravuje za působení vysokého tlaku vysokou rychlostí do tvarové dutiny uzavřené vstřikovací formy. Skládá se z dávkovacího zařízení, plastikačního válce se šnekem, nebo pístem, tryskou, vytápěním a pohonem s regulací. Pístové jednotky jsou dnes již zastaralé a jsou nahrazeny šnekovými jednotkami, které mají oproti nim řadu výhod. Mezi tyto výhody patří větší plastikační výkon, vyšší dosažitelná teplota taveniny, menší tlakové ztráty, vyšší vstřikovací rychlost, vyšší homogenita taveniny, kratší výrobní cyklus a nižší topný příkon vytápění.



Obr. 61 Schematický řez vstřikovací jednotkou [41]

- **Uzavírací jednotka** zprostředkovává veškerý pohyb formy. Stará se o její otvírání a uzavírání takovou silou, aby nemohlo vlivem vstřikovacího tlaku dojít k otevření formy. Pokud by nebyla vyvozena dostatečná uzavírací síla, docházelo by ke vzniku přetoků taveniny v dělicí rovině, vlivem pootevření formy. Uzavírací jednotka obsahuje přidržovací a vyhazovací mechanismus a je poháněna hydraulickými, kloubovými mechanismy se servopohonem, nebo kombinovanými systémy. Pro vysokou přesnost vedení pohyblivých částí formy jsou uzavírací jednotky vybaveny čtyřmi vodícími sloupky. Hlavními parametry uzavírací jednotky jsou její rozměry, geometrie a maximální velikost vyvozené uzavírací síly.



Obr. 62 Příklad uzavírací jednotky stroje [23]

- **Řídící jednotka** je mikroprocesorem řízené zařízení umožňující řízení, kontrolu a optimalizaci kvality procesu vstřikování. Skrze tuto jednotku jsou zadávány jednotlivé vstřikovací parametry procesu. Standardně má podobu dotykové obrazovky doplněné tlačítky, na které je možné zobrazit informace o procesu vstřikování ve formě tabulek a grafů hodnot.

### 3 NÁVRH ŘEŠENÍ

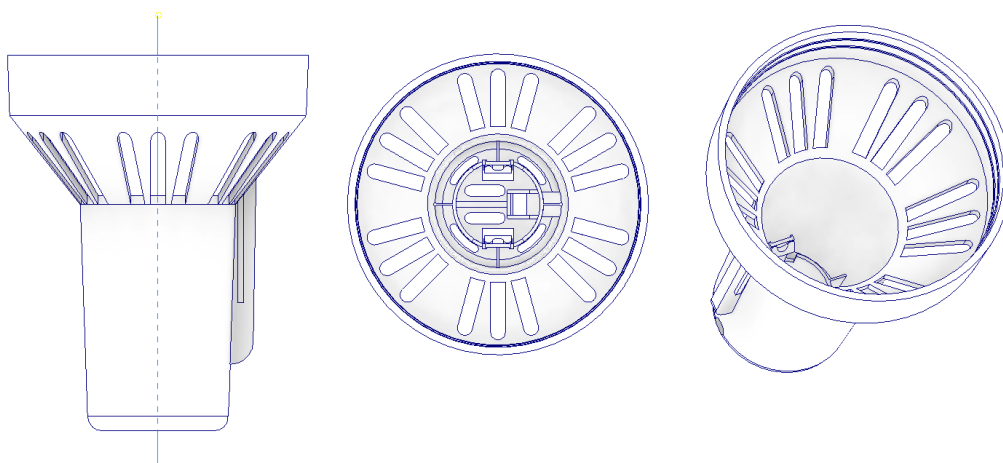
Jak již bylo zmíněno v kapitole 1, je cílem práce návrh technologie výroby nástroje pro plastové stínítko elektrické lampičky, které bude vyrobeno technologií vstřikování termoplastů do kovové formy. Nutno zdůraznit, že cílem práce není řešení výroby samotné formy, ale její návrh a stanovení technologických parametrů a podmínek pro její optimální funkci. Zadáním byla stanovena násobnost formy  $n_f = 2$ , forma bude dvojnásobná.

Řešení výroby součásti stínítka bude obsahovat následující náležitosti:

- Volbu materiálu pro výrobu stínítka.
- Stanovení technologických parametrů vstřikování vybraného materiálu.
- Volbu stroje.
- Konstrukční náležitosti formy – návrh umístění dělicí roviny, vtokového systému, vyhazovacího mechanismu, chladicího systému a mechanismu odvzdušnění formy, včetně speciálních požadavků.
- Počítačovou simulaci vhodnosti řešení v rámci vybraných podkapitol viz výše.
- Technologický postup výroby.
- Technicko-ekonomickému zhodnocení bude věnována následující samostatná kapitola.

Při veškerém řešení je jako CAD podpora používán software Autodesk Inventor Professional 2016 (dále jen Inventor), jehož plná licence je pro studenty zdarma dostupná. Inventor obsahuje jak prvky pro tvorbu 3D modelu a formy, tak výkonné nástroje pro simulaci funkce formy (Moldflow).

Následuje rekapitulace geometrie modelu stínítka. Stínítko je 100 mm vysoké, s největším průměrem v horní části 80 mm a nejmenším průměrem 30 mm v dolní části, při tloušťce stěny 2 mm. Jak již bylo popsáno v kapitole 1.1, obsahuje model několik skupin technologických otvorů zajišťujících cirkulaci horkého vzduchu a zároveň možnost montáže objímky žárovky. Pro upevnění objímky jsou navrženy dva zobáčky opatřené vybráním pro snadné vyjmutí objímky. V dolní oblasti obsahuje stínítko kolmo k vertikální ose díru s vnitřním závitem M5, určeným pro uchycení stínítka na tělo lampičky. Přívod elektrické energie je realizován skrze obdélníkový otvor na dně součásti. Horní strana stínítka je opatřena dvěma vnitřními obvodovými zápichy určenými pro ulpění stínítka na tvárníku při odformování. Je požadován lesk vnitřního povrchu stínítka kromě dna a geometrie uchycení objímky žárovky, což bude realizováno pomocí leštění odpovídajících částí formy na tzv. zrcadlový lesk.



Obr. 63 Rekapitulace geometrie tělesa plastového stínítka lampičky

### 3.1 Volba Materiálu

Materiál pro výrobu stínítka byl stanoven na základě požadavků, které musí výrobek po dobu své životnosti splňovat. Mezi hlavní požadované vlastnosti stínítka patří:

- Neprůhlednost – jelikož jde o stínítko, které by při průhlednosti zcela ztrácelo význam.
- Houževnatost – především u zobáčků, které budou minimálně jednou namáhány ohybem při montáži objímky žárovky.
- Mechanická odolnost – kromě namáhání zobáčků ohybem není kladen zvláštní požadavek na mechanickou odolnost stínítka, bude namáháno pouze svou vlastní vahou, zvýšenou o hmotnost objímky a žárovky.
- Vhodnost pro použití v elektrotechnice – schopnost izolovat elektrický proud a dobrá teplotní stálost při zvýšených teplotách, která může nastat vlivem teplotní emise žárovky při dlouhé době svícení.

Uvažovanými materiály, které by mohly být použity, jsou ABS, PA6 a PC (Lexan). Výše uvedené materiály jsou standardně používány pro krytové součásti typu stínítka v elektrotechnickém průmyslu a vykazují vysokou hodnotu teploty zesklnění, která je nutná pro provoz při častém teplotním zatížení. Také splňují podmínku dobré elektrické průrazové pevnosti, která je nezbytná pro bezpečnost stínítka, při dostatečných mechanických charakteristikách, umožňujících pružný ohyb zobáčků držáku objímky žárovky. Materiál bude tedy z výše uvedených vybrán s přihlédnutím k nejnižší ceně v poměru k vlastnostem plastu.

Byl vybrán materiál PC (Lexan), od výrobce SABIC Innovative Plastics, konkrétně jeho varianta Lexan 925 v bílém provedení, který splňuje všechny předpoklady pro technicky i ekonomicky optimální materiálové řešení. Samotný výrobce jej uvádí jako ideální pro použití na kryty elektrotechniky. Vybrané hodnoty charakteristických vlastností Lexanu 925 jsou uvedeny v tabulce 2.

Tab.2 Vybrané vlastnosti Lexanu 925 [32]

Parametr	Značení	Hodnota	Jednotka
Hustota při 23°C	$\rho$	1,2	[g·cm <sup>-3</sup> ]
Teplota tání	$T_m$	280-310	[°C]
Teplota formy	$T_f$	80-110	[°C]
Teplota vyhazování	$T_e$	60-80	[°C]
Měrná teplotní vodivost	$a_{eff}$	0,112	[mm <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> ]
Rozdíl entalpií	$\Delta h$	350	[kJ·kg <sup>-1</sup> ]
Průměrné smrštění	$S_m$	0,5-0,7	[%]
Index lomu světla	$I$	1,568	[-]
Faktor navýšení objemu taveniny	$K_a$	1,03	[g·cm <sup>-3</sup> ]
Koeficient schopnosti tečení	$K_f$	5,2	[bar·mm]
Teplota sušení	$T_{suš}$	120	[°C]
Doba sušení	$T_{suš}$	2-4	[min]
Maximální obsah vlhkosti	-	0,02	[%]
Max. obvodová rychlost šneku	$v_s$	0,3	[m·s <sup>-1</sup> ]
El. průrazová pevnost	$\Omega$	17	[kV·mm <sup>-1</sup> ]

### 3.2 Technologické výpočty vstřikovacích parametrů

V této podkapitole byly na základě údajů získaných z měření modelu stínítka v Inventoru a tabulkových hodnotách vlastností zvoleného materiálu Lexanu 925 stanoveny technologické parametry, které budou mít rozhodující vliv při volbě stroje pro vstřikování, a také budou stanoveny jednotlivé časové úseky, charakterizující vstřikovací cyklus.

#### 1) Výpočet objemu stínítka $V$ [ $\text{cm}^3$ ] pomocí programu Inventor 2016

$$V = 31,9 \text{ cm}^3$$

#### 2) Výpočet hmotnosti stínítka $m_s$ [g]

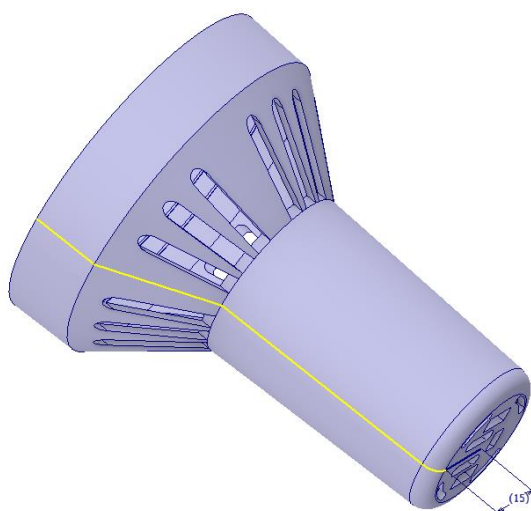
$$m_s = \rho \cdot V = 1,2 \cdot 31,9 = 38,28 \text{ g} \quad (3.1)$$

kde  $\rho$  ... je hustota Lexanu 925 [ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ]

#### 3) Odhad délky dráhy toku taveniny $f_c$ [mm]

$$f_c = 123 \text{ mm}$$

Odhad délky toku taveniny byl stanoven na základě náčrtu modelu stínítka na obr.64. Jsou při tom uvažovány pouze tokové dráhy uvnitř dutiny dílce, dráha taveniny ve vtokové soustavě není uvažována, jelikož bude využita horká vtoková soustava, ve které tavenina netuhne.



Obr.64 Odhad délky dráhy toku taveniny pomocí Inventoru

#### 4) Výpočet velikosti vstřikovací dávky taveniny $V_D$ [ $\text{cm}^3$ ]

$$V_D = \frac{n_f \cdot m_s}{K_a} = \frac{2 \cdot 38,28}{1,03} = 74,33 \text{ cm}^3 \quad (3.2)$$

kde  $K_a$  ... je faktor navýšení objemu taveniny Lexanu [ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ]

$n_f$  ... je násobnost vstřikovací formy [-]

#### 5) Výpočet minimálního vstřikovacího tlaku $p_f$ [bar]

$$p_f = 3 \cdot K_f \cdot f_c \cdot s^{-1,6} = 3 \cdot 5,2 \cdot 123 \cdot 2^{-1,6} = 632,9 \text{ bar} \quad (3.3)$$

kde  $K_f$  ... je koeficient schopnosti tečení Lexanu [ $\text{bar}\cdot\text{mm}$ ]

$s$  ... je tloušťka stěny plastového dílce [mm]



**6) Stanovení doporučeného vstřikovacího tlaku  $p_v$  [bar] z tabulky hodnot tlaků pro vybrané materiály při splnění podmínky  $p_v > p_f$**

*Byl zvolen tlak  $p_v = 650 \text{ bar}$*

**7) Výpočet plochy průřezu tvarové dutiny  $A_{proj}$  [cm<sup>2</sup>] do dělicí roviny**

*Dle výpočtu Inventoru  $A_{proj} = 50,2 \text{ cm}^2$*

**8) Výpočet tvářecího tlaku (tlaku naplnění)  $p_A$  [bar]**

$$p_A = \frac{p_v}{2} + 100 = \frac{650}{2} + 100 = 425 \text{ bar} \quad (3.4)$$

**9) Výpočet uzavírací síly  $F_u$  [kN]**

$$F_u = n_f \cdot A_{proj} \cdot \frac{p_A + 100}{100} = 2 \cdot 50,2 \cdot \frac{425 + 100}{100} = 527 \text{ kN} \quad (3.5)$$

**10) Výpočet průměru šneku  $D_s$  [mm] vstřikovacího stroje**

$$7,5 \cdot \sqrt[3]{V_D} < D_s < 10,5 \cdot \sqrt[3]{V_D} \quad (3.6)$$

$$7,5 \cdot \sqrt[3]{74,33} < D_s < 10,5 \cdot \sqrt[3]{74,33}$$

$$31,5 < D_s < 44,1$$

Tab.3 Doporučené hodnoty průměru šneku

Doporučené hodnoty průměru šneku $D_s$ [mm] vstřikovacího stroje											
20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90

Byl zvolen průměr šneku  $D_s = 45 \text{ mm}$

**11) Výpočet délky dráhy pohybu šneku  $L_s$  [mm] pro vstřikování dávky  $V_D$  [cm<sup>3</sup>]**

$$V_D = \frac{\pi \cdot D_s^2}{4 \cdot 10^3} \cdot L_s \Rightarrow L_s = 1273 \cdot \frac{V_D}{D_s^2} = 1273 \cdot \frac{74,33}{45^2} = 46,7 \text{ mm} \quad (3.7)$$

Současně musí být splněna podmínka

$$D_s < L_s < 3 \cdot D_s$$

$$45 < 46,7 < 135$$

*podmínka je splněna*

**12) Výpočet otáček šneku  $n_s$  [min<sup>-1</sup>] vstřikovacího stroje z maximální obvodové rychlosti šneku**

$$n_s = \frac{60 \cdot 10^3 \cdot v_s}{\pi \cdot D_s} = \frac{60 \cdot 10^3 \cdot 0,3}{\pi \cdot 45} = 127,3 \text{ min}^{-1} \quad (3.8)$$

**13) Výpočet doby chlazení  $t_{ch}$  [s]**

$$t_{ch} = \frac{s^2}{\pi^2 \cdot a_{eff}} \cdot \ln \left( \frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{T_m - T_f}{T_e - T_f} \right) = \frac{2^2}{\pi^2 \cdot 0,112} \cdot \ln \left( \frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{290 - 100}{120 - 100} \right) = 7,4 \text{ s} \quad (3.9)$$

kde  $a_{eff}$  ... je měrná teplotní vodivost Lexanu

$T_m$  ... je teplota taveniny Lexanu

$T_f$  ... je teplota vytemperované vstřikovací formy

$T_e$  ... je teplota vyhazování plastového dílu z formy

Hodnoty  $a_{eff}$ ,  $T_m$ ,  $T_f$ ,  $T_e$  jsou stanoveny z tabulky materiálových hodnot Lexanu

**14) Výpočet doby plnění dutiny formy  $t_v$  [s]**

$$t_v = 0,04 \cdot V_D^{0,834} \cdot \log \left( \frac{\eta}{10} \right) = 0,04 \cdot 74,33^{0,834} \cdot \log \left( \frac{150}{10} \right) = 1,56 \text{ s} \quad (3.10)$$

kde dynamická viskozita  $\eta$  byla stanovena odhadem z grafu 2 přílohy 2.

### 15) Ověření délky dráhy toku taveniny

Na základě grafu materiálových charakteristik Lexanu 925 v dokumentaci firmy Sabic, (příloha 3) byla délka dráhy toku taveniny stanovena jako  $f_c = 123 \text{ mm}$ , kde materiál splňuje podmínku, že odhadovaná délka toku taveniny musí být menší než maximální délka taveniny toku. Materiál podmínku splňuje s rezervou a je tedy vhodně zvolen.

### 16) Výpočet doby vstřikovacího cyklu $t_c$ [s]

$$t_c = t_v + t_{ch} + t_n = 7,4 + 1,56 + 3 = 11,96 \text{ s} \quad (3.11)$$

Vedlejší čas  $t_n$  [s] je volen v rozmezí 3 až 4 s.

Je možný alternativní zápis vztahu (3.12) pro jeho přehlednější grafické zobrazení

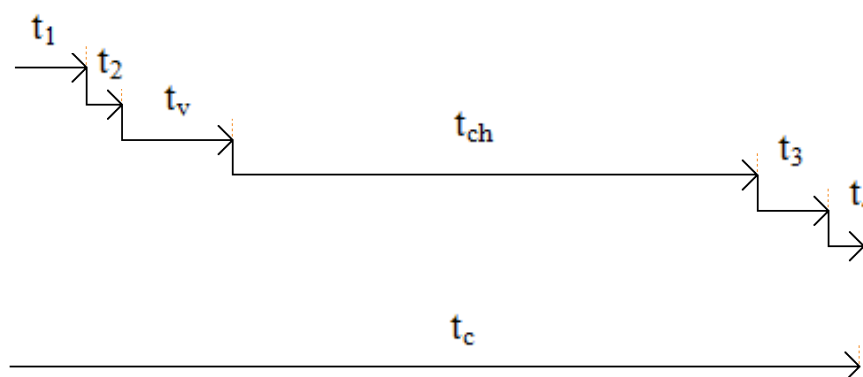
$$t_c = t_1 + t_2 + t_v + t_{ch} + t_3 + t_4 \quad (3.12)$$

kde  $t_1 \dots$  je doba uzavření formy (1- 2 s)

$t_2 \dots$  je doba přisunutí vstřikovací jednotky (0,5 s)

$t_3 \dots$  je doba otevření formy a vyhození výstřiku (1-2 s)

$t_4 \dots$  je doba prodlevy (0,5 s)



Obr. 65 Grafické znázornění jednotlivých částí doby vstřikovacího cyklu

### 17) Výpočet vstřikovací rychlosti

$$v_v = \frac{V_D}{t_v} = \frac{74,33}{1,56} = 47,6 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \quad (3.13)$$

### 18) Výpočet průchodu taveniny materiálu $\dot{G} [\text{kg} \cdot \text{hod}^{-1}]$ ze stroje do formy

$$\dot{G} = \frac{3,6 \cdot V_D \cdot \rho}{t_c} = \frac{3,6 \cdot 74,33 \cdot 1,2}{11,96} = 26,9 \text{ kg} \cdot \text{hod}^{-1} \quad (3.14)$$

### 19) Výpočet tepla $Q [\text{kJ} \cdot \text{hod}^{-1}]$ vneseného taveninou plastu do formy

$$Q = \dot{G} \cdot \Delta h = 26,9 \cdot 350 = 9397 \text{ kJ} \cdot \text{hod}^{-1} \quad (3.15)$$

kde  $\Delta h \dots$  je rozdíl entalpií použitého plastu mezi teplotami  $T_m$  a  $T_c$  [ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ]

## 3.3 Násobnost formy

Jak již bylo zmíněno v úvodu kapitoly, byla na základě zadání stanovena násobnost formy, jako dvojnásobná forma. Znalost násobnosti formy je základním předpokladem pro optimální technologický a konstrukční návrh formy, který má rozhodující vliv na produktivitu výroby zadaného dílce. Samotná hodnota násobnosti je mimo jiné důležitým údajem při výběru stroje pro vstřikování plastů.

Při prvotním návrhu násobnosti formy je obvykle nejprve stanovena praktická násobnost  $n_p$ , která je určena jako odhad z grafu závislosti praktické násobnosti na velikosti výrobní série  $N$  [41]. Praktická násobnost je tedy funkcí velikosti výrobní série. Pro přesnější stanovení násobnosti formy je obvykle používán následující vztah pro tzv. termínovanou násobnost  $n_t$ :

$$n_t = \frac{N \cdot t_c}{\tau_p \cdot K \cdot 3600} [-], \quad (3.16)$$

kde:  $\tau_p$  ... je požadovaný termín splnění dodávky (při 3-směnném provozu) [hod]

$K$  ... je faktor využití pracovního času (0,7-0,9) [-]

$N$  ... je velikost výrobní série [ks]

Pro účely řešení výroby stínítka je však násobnost pevně dána zadáním a na vztah (3.17) tedy nebude brán ohled.

#### 20) Výpočet plastikační kapacity $C_P$ [ $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$ ] vstřikovacího stroje:

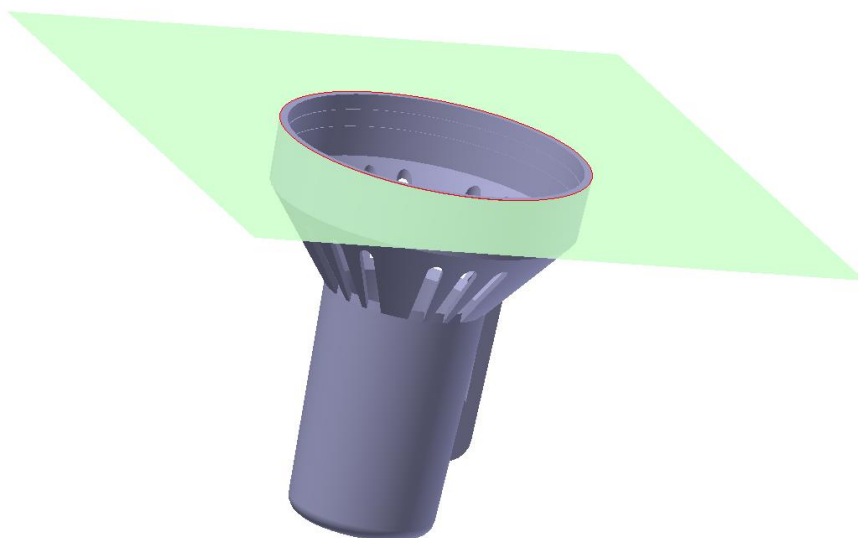
$$C_P \geq \frac{4 \cdot \rho \cdot V_D}{t_c} = \frac{4 \cdot 1,2 \cdot 74,33}{11,96} = 29,8 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1} \quad (3.17)$$

#### 21) Výpočet vstřikovací kapacity $C_V$ [ $\text{cm}^3$ ] vstřikovacího stroje:

$$C_V = 1,1 \cdot n_f \cdot V_D = 1,1 \cdot 2 \cdot 74,33 = 163,5 \text{ cm}^3 \quad (3.18)$$

### 3.4 Návrh polohy dělicí roviny, vtoku a typu vtokového systému

První fází návrhu konstrukčního řešení formy je návrh polohy dělicí roviny, která určuje způsob zaformování tělesa stínítka ve výsledné formě. Stanovuje se zpravidla jedna dělicí rovina, která slouží jako hranice mezi tvárníkem a tvárnicí, tedy mezi pohyblivou a nepohyblivou částí formy. S návrhem může do jisté míry pomoci samotný Inventor, který obsahuje interní modul schopný automaticky rozpoznat a navrhnout nejvhodnější polohu dělicí roviny. V tomto případě bude zvolena poloha dělicí roviny na horní hraně stínítka, kolmo na osu stínítka, v souladu s předpovědí Inventoru, jak je znázorněno na obr. 66.



Obr.66 Volba polohy dělicí roviny formy

Následuje volba umístění vtoku na tělese stínítka. I v tomto případě je možné volbu polohy porovnat s předpovědí Inventoru, který umístění vtoku zvládá rovněž. Ne vždy je ale

tato předpověď reálně použitelná, je nutno výsledky automatické detekce brát s rezervou. Pro umístění vtoku předpověď optimální polohy není potřeba, jelikož je poloha vtoku jasně patrná z reálného modelu zadaného tělesa. Pokud budeme uvažovat část stínítka o větším průměru jako horní stranu a část o menším průměru jako dolní stranu, nachází se poloha vtoku na vnější straně přesně uprostřed dolní strany stínítka, což je zachyceno na fotografii obr. 67. Je z ní patrné, že poloha vtoku byla již v době původního návrhu stínítka stanovena a osvědčila se, není tedy potřeba ji nějakým způsobem měnit.

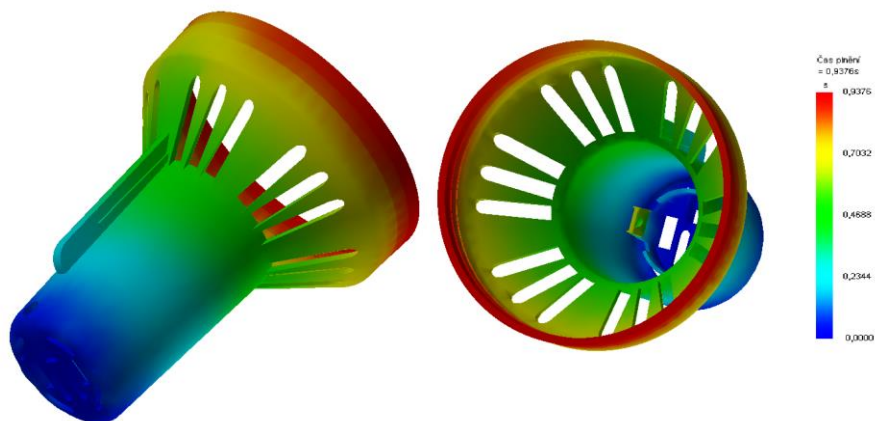
Pouze pro srovnání bude nyní uvedena poloha stínítka, která vznikla jako předpověď Inventoru pro optimální polohu vtoku, zobrazena na obr. 67. Simulační modul stanovuje polohu vtoku s ohledem na zvolený materiál výstřiku, který je nutné specifikovat před zahájením simulace. Z obrázku, zobrazujícího návrh vtoku Inventoru (malý žlutý bod zhruba uprostřed vnitřní stěny stínítka), je patrné, že se jím návrh formy nebude řídit, jelikož by znamenal mnoho komplikací při celkovém návrhu formy ve srovnání s umístěním vtoku podle reálného modelu.



Obr. 67 Umístění vtoku na reálném stínítku (vlevo) a predikce polohy vtoku Inventoru (vpravo)

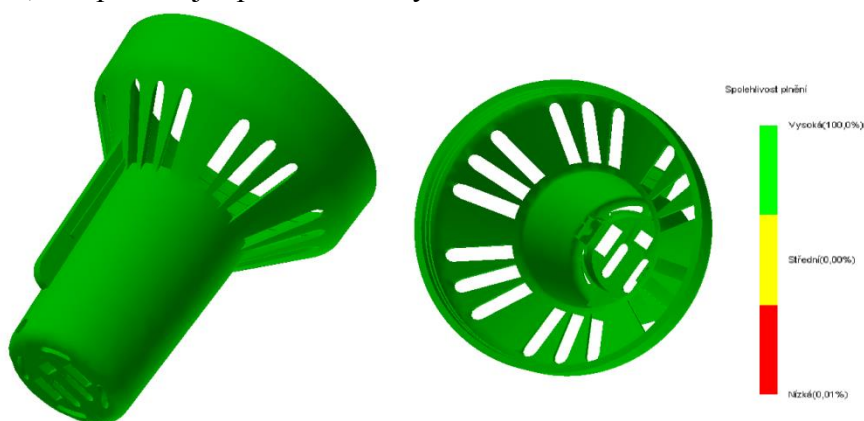
Pro posouzení vhodnosti navržené polohy vtoku byla v Inventoru provedena analýza plnění dílce pomocí modulu Moldflow. Ten poskytuje údaje o čase plnění, spolehlivosti plnění, předpovědi kvality a předpovědi vzniku vzduchových kapes. Kvůli relevanci získaných údajů je analýza prováděna na dílci zvětšeném o předpokládané smrštění, které dokáže Inventor samozřejmě také vypočítat. Program pracuje bez údajů o vtokovém systému a trysce, které v tento moment návrhu ještě nejsou zvoleny, data program generuje pouze na základě geometrie modelu a zadaného materiálu.

- Prvním výstupem simulace je výše zmíněná predikce doby plnění, zobrazená na obr. 68. Podle očekávání je dutina formy plněna ve směru vtoku po dělicí rovinu v celkovém čase 1,56s.



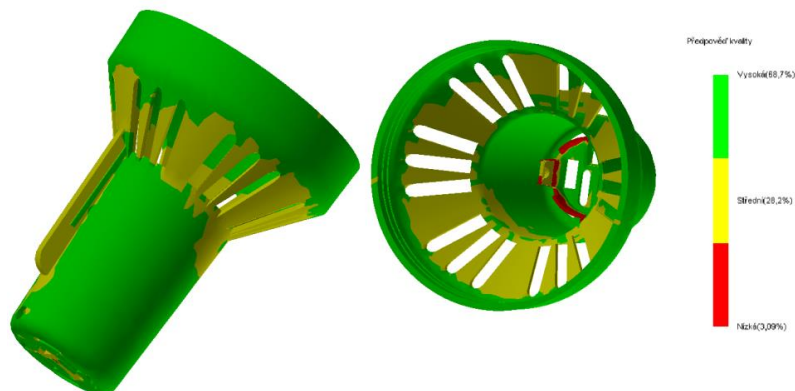
Obr. 68 Predikce doby plnění součásti v Inventoru

- Dalším bodem simulace je predikce spolehlivosti plnění, zobrazená na obr. 68. Ta dopadla velmi pozitivně, jelikož bude podle odhadů celá dutina stínítka vyplněna se 100% spolehlivostí, což potvrzuje správnost volby umístění vtoku.



Obr. 69 Predikce spolehlivosti vyplnění tělesa v Inventoru

- Následuje predikce kvality výstřiku. Ve vnitřní oblasti dolní části stínítka se nachází oblasti snížené kvality, což je ale pochopitelné. V těchto oblastech se zákonitě budou s určitou pravděpodobností vyskytovat vzduchové kapsy. Ty se budou vyskytovat i v oblasti dělicí roviny, odkud ale mohou být na rozdíl od problémového místa odvedeny. Nejedná se o funkční plochy, mají pouze charakter podpory objímky žárovky a navíc i na předloze reálného modelu jsou viditelně deformované, pokřivené, s četnými otřepy. Tato predikce tedy z technologického hlediska nepředstavuje problém.



Obr. 70 Predikce kvality vstřikování stínítka v Inventoru

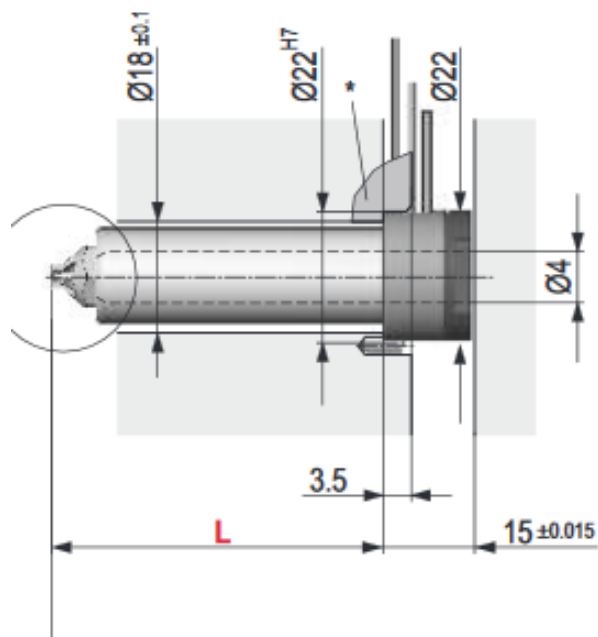


Nyní je třeba zvolit typ vtokové soustavy pro budoucí formu. Jak již bylo popsáno v kapitole 2.3.2, existují dva typy vtokových soustav, vhodných pro technologii vstřikování plastů. První z nich je vtoková soustava se studeným vtokem, která je charakteristická zanecháváním zbytků ztuhlého plastu po každém vstřikovacím cyklu, jelikož plast po opuštění plastikační trysky rychle chladne a rozváděcí kanálky studeného vtokového systému zpravidla neobsahují žádný mechanismus, který by plast nadále držel v plastickém stavu. Studený vtokový systém tedy představuje nárůst doby vstřikovacího cyklu, jelikož je nutno čekat na ztuhnutí plastu v každém cyklu, a zároveň není optimální vznik odpadního materiálu ve formě rozváděcích kanálků a ústí, který však lze ve většině případů recyklovat, v závislosti na konkrétním druhu materiálu. Někdy ovšem není jiná možnost, než použití studeného vtokového systému, například u třídeskových forem.

Pro potřeby formy stínítka je ale studený vtokový systém nedostačující, jelikož předpokládá umístění do dělicí roviny, což z očividných důvodů pro formu stínítka není možné. Místo pro vtok se totiž nachází na opačné straně stínítka, než se nachází jeho dělicí rovina a není proto technicky možné navrhnout kanálky studeného vtokového systému tak, aby se nacházely v dělicí rovině formy.

Pro formu bude tedy vybrán externě vyhřívaný vtokový systém, jelikož výrobce Lexanu zdůrazňuje, že není vhodné používat tento materiál v kombinaci s vnitřně vyhřívaným vtokovým systémem. Při volbě horkého vtokového systému odpadá starost s tvorbou chladících kanálků a vtokových ústí, jelikož horká vtoková tryska, která představuje prodloužení plastikační komory stroje, ústí přímo do dutiny formy.

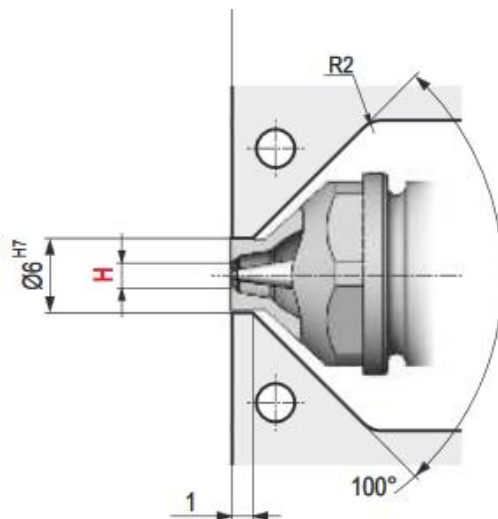
Byla zvolena horká vtoková soustava od firmy Synventive, která patří mezi špičkové producenty horkých vtokových systémů. Jedním z důvodů, proč byla vybrána tryska právě této firmy, byla na rozdíl od ostatních výrobců velmi přívětivá cesta výběru horké soustavy z jejich internetového katalogu, který uživatele doprovázel krok za krokem v jeho volbě konkrétních trysek, jejich počtu, provedení a typu rozvodných bloků podle požadavku aplikace. Prvním z parametrů, o kterém bylo nutno při výběru rozhodnout, byla vzdálenost jednotlivých horkých trysek, respektive vtoků na formě, která je stanovena na 120 mm. Samotné modely horké vtokové soustavy byly pouze velmi obecné a orientační, pro



Obr. 71 Katalogové rozměry horkých trysek Synventive [35]

přesné rozměry trysek by bylo nutné konzultovat přímo jako zákazník se zmíněnou firmou o možnostech využití pro danou formu. Na základě velikosti vstřikovací dávky byla z katalogu firmy Synventive vybrána horká tryska nesoucí označení API 04 C01 Y10T (rozměry jsou uvedeny na obr. 71), což jsou trysky s torpédovým vtokovým ústím a s tzv. face fit technologií. Z katalogu byl dále stanoven rozměr H (červeně na obr. 72) na 1,8 mm a rozměr trysky L (obr. 71) na 46 mm. Pro horké trysky je velice důležitá důkladná termální izolace, které je většinou řešena vzduchovou kapsou mezi horkým rozvodem a deskami, jelikož vzduch je obecně mnohem horší vodič tepla, než ocel, ze které je forma vyrobena.

Horká tryska přináší proti studenému vtokovému systému zásadní úsporu materiálu i času a je tedy předpokladem ekonomicky optimálního řešení výroby. Model horké trysky použitý při konstrukci modelu formy má pouze návrhový charakter a slouží především k určení správné polohy děr v deskách formy. Výrobce by mohlo být dodáno mnoho detailů, např. údaje o trubkových ohřívačích, termočláncích a používaných izolačních prvcích.

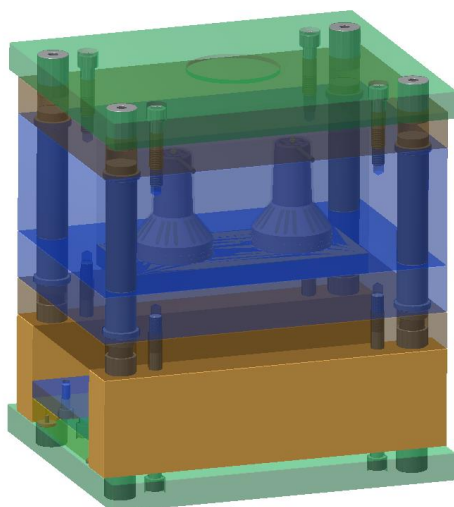


Obr. 72 Druhá část volby rozměrů horké trysky dle katalogu Synventive [35]

### 3.5 Konstrukční řešení formy

První částí konstrukčního návrhu formy je výběr dodavatele materiálu desek a stanovení jejich rozměrů. Pro tyto potřeby obsahuje Inventor obsáhlé knihovny a katalogy součástí jednotlivých dodavatelů, které si ovšem uživatel musí obstarat sám na internetu, jelikož nejsou součástí základní verze programu.

Pro formu stínítka byl zvolen základní formát desek dodavatele HASCO o rozměrech 246 x 346 mm. Desky podléhají standardu K firmy HASCO, který je podrobně popsán v katalogu [13] zmíněné firmy. Znárodnění původního návrhu desek formy je patrné z obr. 73. Základní tvar formy je obdélníkového charakteru zejména z toho důvodu, aby spojovací prvky desek formy nezasahovaly do prostoru, který budou využívat mechanismy pro odformování závitů.

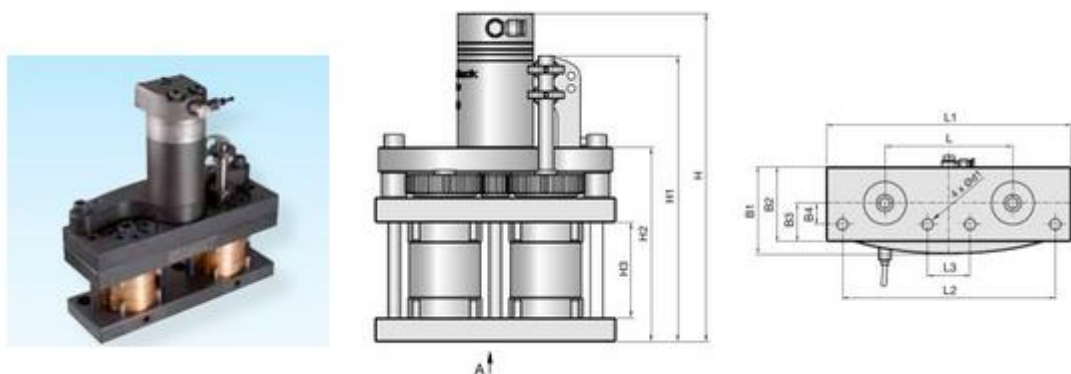


Obr. 73 Základní návrh desek formy

Dále je nutné rozhodnout o způsobu zhotovení bočního vnitřního závitu M5 obou stínítek, což je volba, která bude mít významný vliv na výslednou podobu hotové formy.

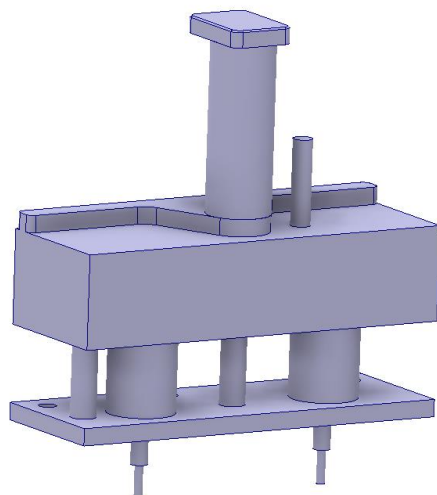
- Realizace by byla možná pomocí bočního výsuvného jádra pouze pro tvorbu válcového otvoru pro budoucí závit. Lze předpokládat, že závit bude použit pouze jednou při montáži stínítka lampičky, kdy pomocí něj bude uchycen k ramenu konstrukce lampičky. Při montáži by tedy bylo možné použít samořezný šroub, což by spojilo dvě operace v jednu - zároveň vytvořit závit i provést montáž. Odpadla by tedy nutnost nákladné investice do vytáčecího vyhazovacího systému.
- Vytáčecí odformovací systém ovšem dosahuje daleko vyšší produktivity, vzhledem k velkému počtu vyráběných kusů v sérii. Takový systém je z boční strany uchycen na pevné straně formy pomocí minimálně 4 šroubů a je vybaven samostatnou pohonnou jednotkou, dle varianty stroje hydraulickou, nebo elektrickou, která obsahuje negativ geometrie závitu a vždy před otevřením formy zajišťuje odformování závitu, který je tedy z celé formy odformován jako první. Takový stroj je schopen vytočení závitu značnou rychlostí, vlivem velmi vysokého krouticího momentu. Vytočení trvá průměrně jednu až dvě vteřiny, v závislosti na délce závitu a požadované dráze odformování. Vzhledem k velikosti výrobní série tedy půjde o znatelnou úsporu času a zlepšení kvality, ve srovnání s první variantou. Mezi nevýhody pak patří cena tohoto systému a nutnost dalšího zdroje energie, který ho bude pohánět.

Pro formu byl vybrán hydraulický odformovací nástroj od firmy STRACK. Jedná se o hydraulické zařízení značené Z5420 typ 5, se dvěma závitovými trny, které bude na formu upevněno pomocí 4 nosných šroubů. Při výběru konkrétního typu v katalogu firmy STRACK [34] byl brán ohled především na vzdálenost mezi oběma odformovanými závity (120 mm) a také na potřebnou hloubku trnu, nutnou, aby nástroj dosáhl až na konec závitu, která byla pomocí Inventoru stanovena na 137 mm od okraje formy. Kompletní specifikace vybraného typu je obsažena ve výňatku z katalogu v příloze 3.



Obr. 74 Zařízení pro vytáčení závitů firmy STRACK Z5420 [55]

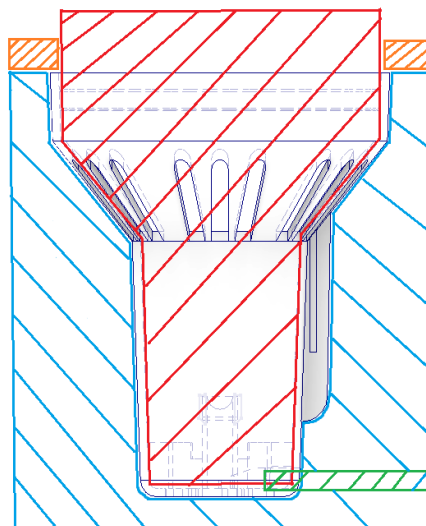
Vzhledem k tomu, že firma neposkytuje 3D modely svých zařízení veřejnosti, byl vytvořen 3D model (obr. 75) výše uvedeného zařízení na základě obrázků a rozměrových údajů z katalogu [34], které jej bude pouze schematicky reprezentovat ve výsledném sestavení formy. Rozměry obdélníkové základny jsou 230 x 82 mm a výška nástroje je rovněž 230 mm.



Obr. 75 Reprezentativní 3D model nástroje pro vytáčení závitu

Dalším konstrukčním prvkem je vyhazovací systém, který se bude starat o vyhození tělesa stínítka z formy. Vyhazovací systémy jsou tradičně řešeny pomocí množství vyhazovacích kolíků, které pomocí rovnoměrně rozprostřeného tlaku na součást způsobí její sejmutí z tělesa tvárníku. Takový princip ovšem není možné aplikovat v případě rotačních tenkostěnných součástí, jako je stínítko, což je dáno jeho geometrií a také tenkostěnností, pro kterou není použití kolíků ideální a mohlo by vést k poškození součásti při vyhazování.

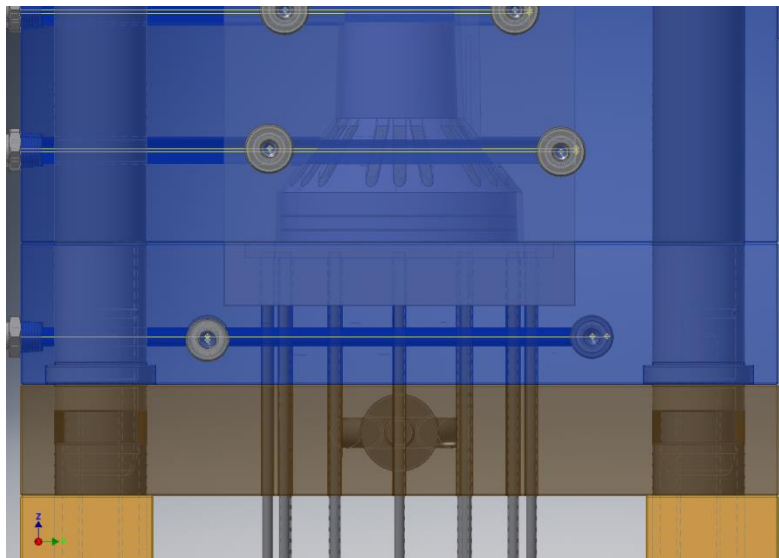
Alternativou vyhazovacích kolíků je tedy použití stírací desky, která sejme vyhazovaný výstřik po celém jeho obvodu bez rizika lokálního poškození. Schematicky je princip zaformování celé součásti, včetně závitového vytáčecího zařízení a stírací desky znázorněn na obr. 76, kde červená barva představuje tvárník, modrá tvárnici, oranžová stírací desku (prstenec) a zelená závitový trn odformovacího zařízení.



Obr. 77 Schematický náčrt zaformování stínítka

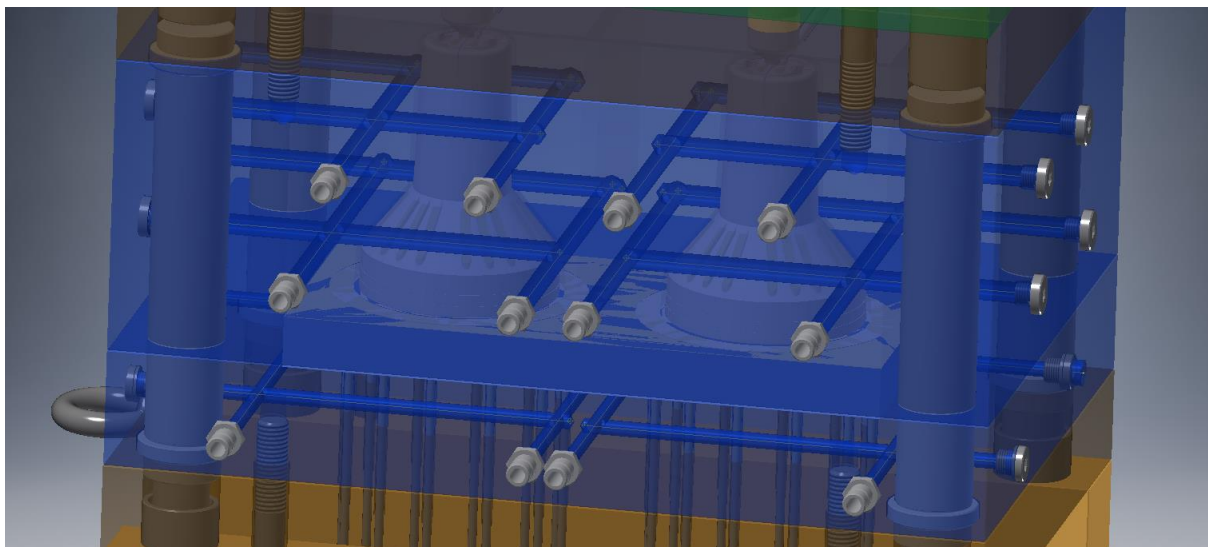
Konkrétní řešení stíracích desek formy je naznačeno na obr. 77. Desky budou mít zároveň další úlohu – skrze mezeru mezi stíracími deskami a tvárníkem bude realizováno odvětrání formy, pro zabránění rozměrových defektů vlivem nahromaděné vzduchové kapsy, která je tokem taveniny hnána právě do této oblasti stínítka, které je nejvzdálenější vtokovému systému. Jsou zde dvě malé stírací desky prstencového tvaru, pevně spojené se skupinami 12 kolíkových vyhazovačů radiálně po obvodu obou stíracích desek, což je pro

přehlednost na obr. 77 znázorněno pomocí pohledu obsahujícího skryté hrany, aby byla patrná funkce vyhadzovacího systému.



Obr. 77 Znázornění mechanismu funkce stíracího prstence

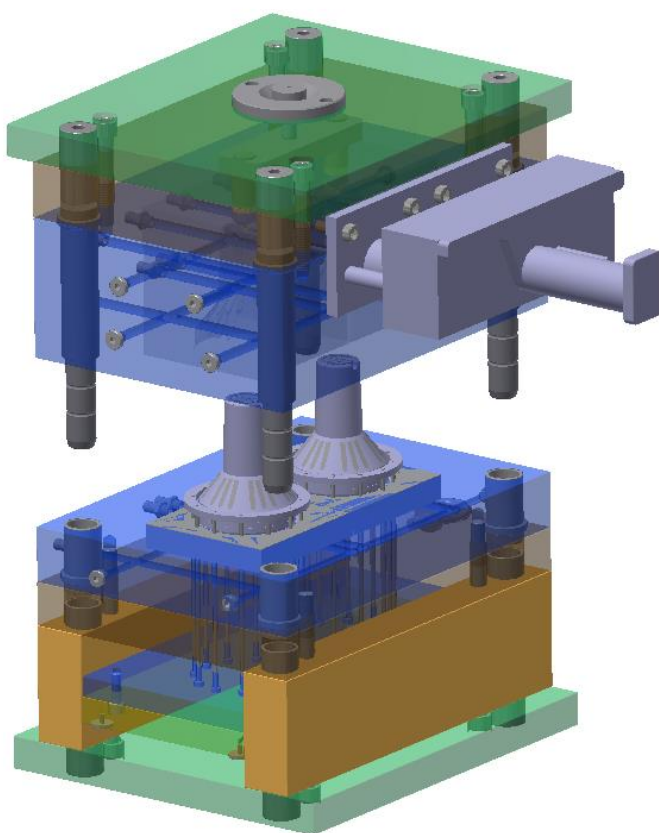
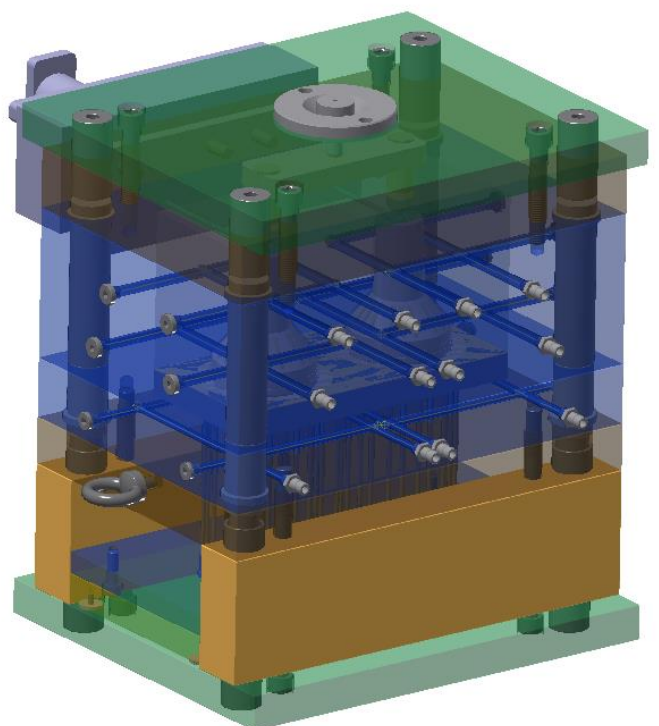
Následuje řešení temperace formy, které je realizováno pomocí rozvodných kanálků chladičí kapaliny – vody. Formu je potřeba vydatně chladit, jelikož je Lexan zpracováván při poměrně vysokých teplotách. Byly navrženy dva temperační okruhy pro každou část tvárnice a jeden okruh pro každou část tvárníku, jak je znázorněno na obr. 79.



Obr. 78 Pohled na temperační systém formy

Následují dva pohledy na kompletní formu, včetně připojeného modelu hydraulického zařízení vytáčejiho závity.

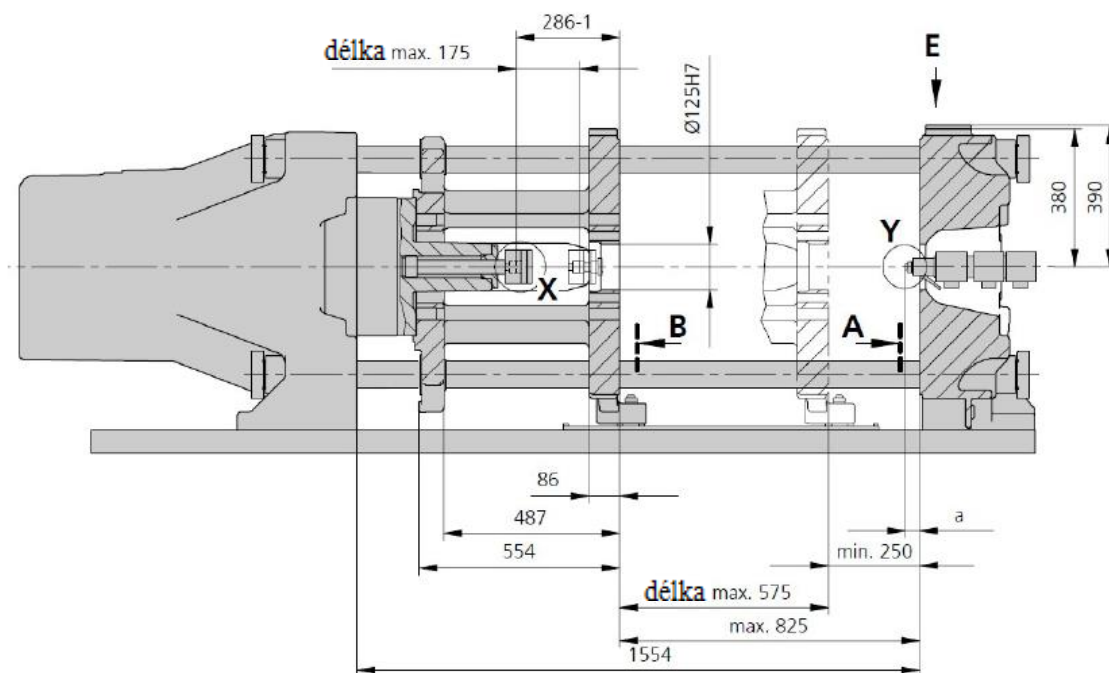




Obr. 79 Finální pohledy na vstřikovací formu

### 3.6 Volba stroje

Stroj pro vstřikování byl vybrán na základě vypočtených hodnot technologických parametrů vstřikování v kapitole 3.2 a stanovení velikosti rozměrů desek v kapitole 3.5. Byly tedy specifikovány všechny údaje potřebné pro výběr stroje. Vybraným strojem je Allrounder 520S od německé firmy Arburg, který se na základě katalogových údajů nejvíce přibližuje parametrům potřebným pro výrobu stínítka. Na obr. 80 je zobrazen schematický řez strojem a dále uvedená tab.4 uvádí srovnání vypočtených technologických parametrů se strojovými parametry při kontrole vhodnosti výběru stroje. Stroj všechny uvedené parametry splňuje s rezervou.



Obr. 80 Schematické znázornění klíčových rozměrů stroje Allrounder 520S [1]

Tab. 4 Ověření správnosti volby stroje Allrounder 520S

Parametr	Jednotka	Požadovaná hodnota	Allrounder 520S	Splnění požadavku
Přidržovací síla	kN	527	1300	Ano
Průměr šneku	mm	45	45	Ano
Vstřikovací kapacita	cm <sup>3</sup>	74,33	188	Ano
Plastikační kapacita	kg h <sup>-1</sup>	26,9	28,5	Ano
Vstřikovací tlak	bar	650	1530	Ano
Vstřikovací rychlost	cm <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	47,6	232	Ano
Délka pohybu šneku	Mm	46,7	150	Ano
Vzdálenost mezi deskami	mm		825	Ano
Minimální výška formy	mm	384	250	Ano
Maximální výška formy	mm	500	575	Ano
Vzdálenost mezi sloupky	mm	246 x 364	520 x 520	Ano
Pohyb vyhazovacího	mm	100	175	Ano

### 3.7 Technologický postup

- 1) Sušení granulátu Lexanu v uzavřené sušící jednotce, propojené s plastikační jednotkou stroje Allrounder 520S, na maximální přípustnou vlhkost 0,02%.
- 2) Upnutí vstřikovací formy na stroj Allrounder 520S pomocí stupňovitých upínek, zapojení okruhu chlazení formy, zapojení okruhu napájení horké vtokové soustavy.
- 3) Kontrola připojení nástroje pro vytáčení závitů STRACK Z 5420 5 ke zdroji energie a jeho správného seřízení.
- 4) Zapnutí vstřikovacího stroje.
- 5) Temperování formy na teplotu 100 °C.
- 6) Nastavení parametrů vstřikování dle tab. 5.
- 7) Spuštění automatického cyklu naprázdno, bez plnění taveninou, při kterém je postupně odladěn nejkratší možný vstřikovací cyklus, pomocí optimalizace pohybů plastikační a uzavírací jednotky.
- 8) Spuštění automatického cyklu, včetně fází plnění, dotlaku, protitlaku a chlazení.
- 9) Transport výrobků na kontrolní pracoviště.
- 10) Kontrola rozměrů výstřiku a případných vad – kontrola pro náhodných 5 kusů z každých 500 kusů.
- 11) Balení hotových dílců do krabic, nebo transport na pracoviště montáže, pokud je montáž celé lampičky prováděna přímo v přípustné blízkosti oblasti výroby stínítka.

Tab.5 Technologické parametry pro vstřikování [41],[32],[1]

Nastavovaný parametr	Hodnota	Jednotka
Vstřikovací tlak	650	bar
Dotlak	400	bar
Protitlak	100	bar
Vstřikovaná dávka	74,33	°C
Teplota granulátu v násypce	80	°C
Teplota 1. pásma plastikačního válce	280	°C
Teplota 2. pásma plastikačního válce	290	°C
Teplota 3. pásma plastikačního válce	310	°C
Teplota taveniny v trysce	290	°C
Teplota temperace formy	100	°C
Dráha šneku	46,7	mm
Otáčky šneku	127,3	min <sup>-1</sup>
Vstřikovací rychlost	47,6	cm <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>
Doba vstřikovacího cyklu	11,96	s
Doba plnění tvarových dutin formy	1,56	s
Doba chlazení	7,4	s
Uzavírací síla	527	kN
Vyhazovací síla	50	kN
Zdvih vyhazování	100	mm

## 4 TECHNICKO EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

V této kapitole bude provedeno technicko ekonomické zhodnocení výroby plastového stínítka dle všech specifikací uvedených v předchozích kapitolách při uvažované sérii 150 000 kusů výrobků. Ceny jednotlivých položek jsou brány přímo z katalogů výrobců : HASCO (desky formy), Arburg (vstřikovací stroj), Synventive (horký vtokový systém), SABIC (materiál Lexan) a STRACK (nástroj pro vytáčení závitu). Ekonomické zhodnocení uvažuje náklady na dílec spojené se všemi potřebnými nástroji, ať jde o jejich nákup, nebo výrobu. Zahrnuje také mzdy dělníků a jeho cílem je především nalezení tzv. bodu zvratu, který dokazuje ekonomickou vhodnost navrženého řešení.

### 4.1 Stanovení ceny výrobku

#### 1) Strojní náklady, sazba za hodinu provozu stroje $M_s$ [Kč·hod<sup>-1</sup>]

$$M_s = \frac{P_s \cdot C_E}{K_s} = \frac{30,9 \cdot 3,3}{0,8} = 127,5 \text{ Kč} \cdot \text{hod}^{-1}, \quad (4.1)$$

kde  $P_s$  ... je příkon stroje [kW]

$C_E$  ... je cena elektrické energie [Kč·kWh<sup>-1</sup>]

$K_s$  ... je koeficient opotřebení stroje [-]

#### 2) Strojní čas doby chodu stroje $T_s$ [hod]

$$T_s = t_c \cdot \frac{N}{n_f} = 11,96 / 3600 \cdot \frac{150000}{2} = 249 \text{ hod}, \quad (4.2)$$

kde  $t_c$  ... je celkový čas vstřikovacího cyklu [s]

$N$  ... je velikost výrobní série [ks]

$n_f$  ... je násobnost formy [-]

#### 3) Cena celé série plastových dílců vztažená na dílec $K_D$ [Kč]

$$K_D = C_M \cdot m_s \cdot N = 32 \cdot 0,03828 \cdot 150000 = 183744 \text{ Kč}, \quad (4.3)$$

kde  $C_M$  ... je cena materiálu Lexanu [Kč·Kg<sup>-1</sup>]

$m_s$  ... je hmotnost stínítka [Kg]

#### 4) Náklady na vstřikovací formu $W_F$ [Kč]

$$W_F = W_{HVS} + W_{ZVS} + W_{VMF} = 200\,000 + 100\,000 + 690\,000 = 990\,000 \text{ Kč}, \quad (4.4)$$

kde  $W_{HVS}$  ... je cena horkého vtokového systému [Kč]

$W_{ZVS}$  ... je cena závitového vytáčecího zařízení [Kč]

$W_{VMF}$  ... je cena materiálu a výroby formy [Kč]

#### 5) Odhad obecných nákladů režie $N_R$ [Kč]

$$N_R = 30\,000 \text{ Kč}$$

#### 6) Odpisy z pořizovacích nákladů vstřikovacího stroje $N_{OSR}$ [Kč·rok<sup>-1</sup>]

$$N_{OSR} = \frac{N_s}{T_{zs}} = \frac{2\,400\,000}{7} = 342\,857 \text{ Kč} \cdot \text{rok}^{-1}, \quad (4.5)$$

kde  $N_s$  ... je cena stroje [Kč]

$T_{zs}$  ... je plánovaná životnost stroje [rok]

#### 7) Doba zhotovení kompletní série plastových dílů $T_P$ [hod]

$$T_P = \frac{N \cdot t_c \cdot K_Z}{n_f \cdot K_C} = \frac{150000 \cdot 11,96 \cdot 1,01}{2 \cdot 0,85} = 296 \text{ hod}, \quad (4.6)$$

kde  $K_Z$  ... je koeficient zmetkovitosti [-]

$K_C$ ...je koeficient využití času [-]

**8) Odpisy z pořizovací hodnoty stroje po dobu výroby série  $N_{OS}$  [Kč]**

$$N_{OS} = N_{OSR} \cdot T_P = 324\,857 \cdot 296 = 109\,76 \text{ Kč}, \quad (4.7)$$

**9) Výpočet nákladů na mzdy dělníka obsluhy  $N_{mzd}$  [kč]**

$$N_{DMZD} = T_S \cdot N_{MZD} = 249 \cdot 130 = 32\,370 \text{ Kč}, \quad (4.8)$$

kde  $N_{MZD}$  ... je hodinová hrubá mzda dělníka stanovená na 130Kč/hod

**10) Stanovení vlastních nákladů na 1 dílec S [ $Kč \cdot ks^{-1}$ ]**

$$S = \frac{M_S \cdot T_S + K_D + W_F + N_R + N_{OS} + N_{DMZD}}{N} = \quad (4.9)$$

$$S = \frac{127,5 \cdot 249 + 183\,744 + 990\,000 + 30\,000 + 109\,76 + 32\,370}{150\,000} = 8,52 \text{ Kč}$$

**11) Výpočet konečné ceny 1 výrobku C [Ks]**

$$C = \frac{S \cdot N \cdot (1 + \frac{Z_C}{100})}{N} \cdot \left(1 + \frac{Q_C}{100}\right) = \quad (4.10)$$

$$C = \frac{8,52 \cdot 150\,000 \cdot (1 + \frac{40}{100})}{150\,000} \cdot \left(1 + \frac{35}{100}\right) =$$

$$C = 16,1 \text{ Kč},$$

kde  $Z_C$  ... je výrobní zisk [%]

$Q_C$ ... je obchodní přírážka [%]

**12) Stanovení bodu zvratu  $Q_B$  [ks], po kterém již nevzniká finanční ztráta**

$$Q_B = \frac{W_F + N_R}{C - S} = \frac{990\,000 + 30\,000}{16,1 - 8,52} = 134\,564 \text{ ks} \quad (4.11)$$

Po tomto počtu vyrobených kusů bude výroba zisková.

## 4.2 Doba splnění dodávky

**1) Doba potřebná pro návrh vstřikovací formy  $t_K$  [hod]**

$$t_K = 168 \text{ hod}$$

čas na vypracování potřebné dokumentace a 3D modelů je odhadován na 1 týden

**2) Doba výroby vstřikovací formy  $t_f$  [hod]**

$$t_f = T_F \cdot n_f^{0,7} = 336 \cdot 2^{0,7} = 545 \text{ hod}, \quad (4.12)$$

kde  $T_F$  ... je předpokládaná doba výroby formy s násobností 1[hod]

**3) Doba splnění dodávky  $t_D$  [dnů]**

$$t_D = t_K + t_f + T_P = 168 + 545 + 296 = 1009 \text{ hod} = 42 \text{ dnů} \quad (4.13)$$



## 5 ZÁVĚRY

Tato diplomová práce se zabývala návrhem technologie výroby stínítka lampičky z plastu. Stínítko je tenkostěnná rotační součást o výšce 100 mm, která přechází z největšího průměru 80 mm do nejmenšího průměru 30 mm. Bylo rozhodnuto, že stínítko bude vyráběno technologií vstřikování termoplastů, jelikož pro jeho geometrii žádná jiná metoda zpracování plastů není vhodná. Za materiál pro výrobu stínítka byl zvolen polykarbonát Lexan 925, především kvůli jeho odolnosti vůči vysoké teplotě a vysoké elektrické průrazové pevnosti, zaručující jeho bezpečné použití.

Na základě předlohy reálného modelu stínítka byl vytvořen 3D model v CAD systému Autodesk Inventor 2016, pomocí kterého byla navržena vstřikovací forma pro výrobu. Při zvážení výrobní série 150 000 ks byla stanovena násobnost formy jako dvojnásobná. Byla navržena dvou desková forma, vybavená horkým vtokovým systémem, stíracím mechanismem pro vyhazování stínítka z formy a hydraulickým zařízením pro odformování závitu, jelikož stínítko obsahuje vnitřní závit umístěný ve směru kolmo na osu otevírání formy. Poloha vtoku byla stanovena na základě předlohy skutečného modelu a jeho vhodnost byla ověřena počítačovou simulací plnění. Optimální doba vstřikovacího cyklu byla výpočtem stanovena na 11,96 s, při použití vstřikovacího stroje Allrounder 520S firmy Arburg. Pro odformování závitů bylo vybráno hydraulické zařízení firmy Strack, označované jako Z5420. Byl použit horký vtokový systém od firmy Synventive.

Při technicko ekonomickém zhodnocení byla stanovena hodnota vlastních nákladů na 1 stínítko 8,52 Kč. Byl vypočten bod zvratu, při 134564 vyrobených kusech ze série 150 000 kusů. Výroba stínítka na základě předkládaného řešení je tedy zisková. Lze očekávat, že se zvětšováním výrobní série by rostl i zisk.

## Seznam použitých zdrojů

1. ARBURG. *ALLROUNDER 520 S: Machine technical data*. Lossburg, 2014. Dostupné také z: [https://www.arburg.com/fileadmin/redaktion/Mediathek/Technische\\_Daten/ARBURG\\_ALLROUNDER\\_520S\\_TD\\_529082\\_en\\_GB.pdf](https://www.arburg.com/fileadmin/redaktion/Mediathek/Technische_Daten/ARBURG_ALLROUNDER_520S_TD_529082_en_GB.pdf)
2. ASHBY, Mike. *Material and process selection charts* [online]. Cambridge University [cit. 2016-05-26]. Dostupné z: [http://www.mie.uth.gr/ekp\\_yliko/2\\_materials-charts-2009.pdf](http://www.mie.uth.gr/ekp_yliko/2_materials-charts-2009.pdf)
3. *Autoevolution: ASTON MARTIN Vanquish Review* [online]. 2014 [cit. 2016-05-26]. Dostupné z: <http://www.autoevolution.com/reviews/2014-aston-martin-vanquish-review-2013-safety.html>
4. *Background on Single-Material Molding: Single-Material Molding Equipment* [online]. [cit. 2016-05-26]. Dostupné z: <http://terpconnect.umd.edu/~skgupta/M3T/SM.html>
5. BĚHÁLEK, Luboš. *Navlhavost, Morfologie a Reologie plastů* [online]. Katedra strojírenské technologie TUL [cit. 2016-05-26]. Dostupné z: <http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/Intech/>
6. BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery* [online]. [cit. 2016-05-26]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Cover.html>
7. BOBEK, Jiří. *Vstřikovací formy pro zpracování termoplastů* [online]. [cit. 2016-05-26]. ISBN 978-80-88058-65-6. Dostupné z: <https://publi.cz/books/179/Impresum.html>
8. BOEDIGHEIMER, Reimund. *Fettbildung und -abbau Fettzellen Veresterung Hydrolyse Darm, Fettzellen.: Präsentation* [online]. , 23 [cit. 2016-05-26]. Dostupné z: <http://slideplayer.org/slide/895284/>
9. DAĐOUREK, Karel. *Plasty: Základy materiálového inženýrství* [online]. Technická univerzita v Liberci, 2010 [cit. 2016-05-26]. Dostupné z: [http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady\\_kmt\\_bakalari/ZMI/05plastyzmi.pdf](http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_bakalari/ZMI/05plastyzmi.pdf)
10. *Daily Tech: Boeing 787 Unveiled in the Virtual World* [online]. 2006 [cit. 2016-05-26]. Dostupné z: <http://www.dailytech.com/Boeing+787+Unveiled+in+the+Virtual+World/article5278.htm>
11. *Dolce Gusto: Product Image* [online]. [cit. 2016-05-26]. Dostupné z: <https://www.dolce-gusto.cz/>
12. DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006, 278 s. : il. ; 28 cm. ISBN 8070806176.
13. *HASCO K-Normalien: Catalog*. Dostupné také z: <http://pdf.directindustry.com/pdf/hasco/k-catalog/15600-307929.html>
14. HORÁKOVÁ, M. *Vznik plastů: podmínky, typy reakcí* [online]. Jihočeská Univerzita v Českých Budějovicích [cit. 2016-05-26]. Dostupné z: [https://www.pf.jcu.cz/structure/departments/kaft/wp-content/uploads/MTD1\\_pr01.pptx](https://www.pf.jcu.cz/structure/departments/kaft/wp-content/uploads/MTD1_pr01.pptx)
15. HORSKÁ, Pavlína. *Optimalizace povrchových úprav polymerů pro mikroskopická pozorování* [online]. Brno, 2011 [cit. 2016-05-26]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=36908](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=36908). Diplomová práce. FCH VUT Brno. Vedoucí práce Ing. RADKA BÁLKOVÁ, Ph.D.
16. HYNEK, Martin. *HORKÉ VTOKY: Plastové Díly* [online]. ZCU Fakulta strojní [cit. 2016-05-26]. Dostupné z: [https://www.kks.zcu.cz/projekty-ver-fin/OPVK\\_PU/KA\\_05\\_publikace/KA05\\_Horke\\_vtoky.pdf](https://www.kks.zcu.cz/projekty-ver-fin/OPVK_PU/KA_05_publikace/KA05_Horke_vtoky.pdf)
17. *Innovative Science inc: Polymer science* [online]. 2007 [cit. 2016-05-26]. Dostupné z: <http://innovscience.com/polymer.php>
18. JANOVEC, Jiří. *Volba materiálu: Nauka o materiálu* [online]. ČVUT [cit. 2016-05-26]. Dostupné z: [http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/7\\_volba-materialu.pdf](http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/7_volba-materialu.pdf)
19. JÍLEK, Bohumil. *VÝROBA VSTŘIKOVACÍ FORMY*. Brno, 2009. Dostupné také z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=14760](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=14760). Diplomové práce. VUT FSI Brno. Vedoucí práce Doc. Ing. MIROSLAV PÍŠKA, CSc.

20. KANDUS, Bohumil. *Technologie zpracování plastů: Přednášky z předmětu*. VUT FSI Brno, 2014.
21. LEDERER, Jaromír. *Polymery I: Prezentace* [online]. Univerzita J.E.Purkyně v Ústí.n.L. [cit. 2016-05-26]. Dostupné z: <http://chemistry.ujep.cz/userfiles/files/POLYMERY2013.pdf>
22. LENFELD, Petr. *Technologie II - Zpracování plastů: Skripta* [online]. TUL Liberec Fakulta Strojní [cit. 2016-05-26]. Dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce\\_plasty/obsah\\_plasty.htm](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/obsah_plasty.htm)
23. LENFELD, Petr. *Technologie vstřikování* [online]. [cit. 2016-05-26]. ISBN 978-80-88058-74-8. Dostupné z: <https://publi.cz/books/184/Impresum.html>
24. MENGES, Georg, Walter MICHAELI a Paul MOHREN. *How to make injection molds*. 3rd ed. Munich ; Cincinnati: Hanser, 2001, 612 s. : il. ISBN 3446212566.
25. *Moriyama.com: Moriyama's Automated Line* [online]. [cit. 2016-05-26]. Dostupné z: <http://www.ms-moriyama.co.jp/en/products/auto>
26. NEUHÄUSL, Emil. Polymery amorfní a semikrystalické z hlediska vstřikování. *MM Průmyslové Spektrum* [online]. 2012 [cit. 2016-05-26]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/polymery-amorfni-a-semikrystalicke-z-hlediska-vstrikovani.html>
27. PAVLÁTOVÁ, Věra. *Polymery: Prezentace* [online]. 2011 [cit. 2016-05-26]. Dostupné z: [dum.rvp.cz/materialy/stahnout/fphmmmeb/Polymery.ppt](http://dum.rvp.cz/materialy/stahnout/fphmmmeb/Polymery.ppt)
28. PAVLÍČEK, David. *Vodivé a polovodivé polymery* [online]. Ostravská univerzita v Ostravě, 2008 [cit. 2016-05-26]. Dostupné z: [katedry.osu.cz/kch/zch/souch/polymery.ppt](http://katedry.osu.cz/kch/zch/souch/polymery.ppt)
29. *Plasty: Podklady pro bakalářské studium* [online]. TUL [cit. 2016-05-26]. Dostupné z: [www.kmt.tul.cz/edu/podklady\\_kmt\\_bakalari/NOM2/PLASTY\\_podklady.ppt](http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_bakalari/NOM2/PLASTY_podklady.ppt)
30. *Plasty: Vyučovací prezentace* [online]. Západočeská Univerzita v Plzni [cit. 2016-05-26]. Dostupné z: <http://www.ateam.zcu.cz/download/plasty.pdf>
31. *Polymer Additives and Mechanical Properties* [online]. 2003 [cit. 2016-05-26]. Dostupné z: <http://users.khbo.be/coudevil/voordrachten/puc/lexan2.htm>
32. SABIC. *LEXAN™ Resin 925: Material documentation*. Dostupné také z: <https://www.sabic-ip.com/gepapp/eng/weather/weatherhtml?sltRegionList=1002002000&sltPrd=1002003008&sltGrid=1002010885&sltUnit=0&sltModule=DATASHEETS&sltVersion=Internet&sltType=Online>
33. SOVA, Miloš a Josef KREBS. *Termoplasty v praxi*. Praha: Dashöfer, 1999. ISBN 8086229157.
34. *STRACK Normalien Thread Unscrewing units: Catalog*. Dostupné také z: <http://pdf.directindustry.com/pdf/strack-normalien/thread-unscrewing-units/15598-608808.html>
35. *Synventive Molding Solutions: Series 04 C01: Manifold Nozzles, Face Fit*. Trademark of Synventive Molding Solutions. Dostupné také z: [http://www.synventive.com/uploadedFiles/Products/Hot\\_Runner\\_Systems/Nozzles/PDFs/MK-PRM.BRM.GB-P.I04C01.pdf](http://www.synventive.com/uploadedFiles/Products/Hot_Runner_Systems/Nozzles/PDFs/MK-PRM.BRM.GB-P.I04C01.pdf)
36. ŠTĚPEK, Jiří, Antonín KUTA a Jiří ZELINGER. *Technologie zpracování a vlastnosti plastů*. Praha: SNTL, 1989, 637 s.
37. *Technologie zpracování nekovů: Podklady pro cvičení* [online]. Technická univerzita Liberec [cit. 2016-05-26]. Dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud\\_materialy/tzn/c2/](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/tzn/c2/)
38. *TheItWares: Product Description* [online]. [cit. 2016-05-26]. Dostupné z: <http://www.theitwares.com/dragon-war-phantom-ele-g4-usb-laser-mouse.html>
39. WEISS, Viktorie a Jaroslava SVOBODOVÁ. *Makromolekulární látky kolem nás: Věda pro život, život pro vědu* [online]. Ústí.n.L., 2015 [cit. 2016-05-26]. Dostupné z:

- [http://www.csvs.cz/projekty/2014\\_veda\\_pro\\_zivot/KA3\\_prilohy/prezentace-k-prednaskam/13\\_Viktorie%20Weiss\\_Makromolekularni\\_latky.pdf](http://www.csvs.cz/projekty/2014_veda_pro_zivot/KA3_prilohy/prezentace-k-prednaskam/13_Viktorie%20Weiss_Makromolekularni_latky.pdf)
40. ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů: úvod do vstřikování termoplastů*. Praha: BEN - technická literatura, 2009, 246 s. : il., plány, příklady. ISBN 9788073002503.
41. ŽÁK, Ladislav. *Vstřikovací formy: podklady pro cvičení z předmětu Tvářecí nástroje* [online]. [cit. 2016-05-26]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/cviceni\\_soubory/htn\\_\\_tvareci\\_nastroje\\_vstrikovaci\\_formy\\_\\_zak.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/cviceni_soubory/htn__tvareci_nastroje_vstrikovaci_formy__zak.pdf)
42. PC resin product brochure: Sabic [online]. [cit. 2016-05-27]. Dostupné z: [http://kbam.geampod.com/KBAM/Reflection/Assets/Thumbnail/6217\\_22.pdf](http://kbam.geampod.com/KBAM/Reflection/Assets/Thumbnail/6217_22.pdf)

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

Symbol	Význam	Jednotka
2D	Dvou dimenzionální	[-]
3D	Tří dimenzionální	[-]
ABS	Termopolymer akrylonitrilu, butadienu a styrenu	[-]
$a_{eff}$	Měrná teplotní vodivost polymeru	$[mm^2 \cdot s^{-1}]$
$A_{proj}$	Plochy průmětu jedné tvarové dutiny do dělicí roviny	$[cm^2]$
$C$	Výpočet konečné ceny plastového dílce	$[Kč/ks]$
CAD	Computer-aided design	[-]
$C_E$	Cena elektrické energie	$[Kč/kWh]$
$C_M$	Cena materiálu Lexanu	$[Kč/kg]$
$C_P$	Měrná tepelná kapacita polymeru	$[J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}]$
$C_V$	Vstřikovací kapacita vstřikovacího stroje	$[cm^3]$
$D_s$	Průměr šneku vstřikovacího stroje	$[mm]$
$f_c$	Celková délka dráhy toku taveniny	$[mm]$
$F_p$	Přisouvací síla	$[kN]$
$F_u$	Uzavírací síla	$[kN]$
$\dot{G}$	Průchodu taveniny ze stroje do formy	$[kg/hod]$
$I$	Elektrický proud	$[A]$
$K_a$	Faktor navýšení objemu taveniny Lexanu	$[g/cm^3]$
$K_{\check{c}}$	Koeficient využití času	[-]
$K_D$	Náklady na celou sérii plastových dílců, závislé na dílci	$[Kč]$
$K_f$	Faktor schopnosti tečení Lexanu	$[bar/mm]$
$K_S$	Koeficient opotřebení stroje	[-]
$K_Z$	Koeficient zmetkovitosti	[-]
$L$	Délka nezahřátých horkých trysek	$[mm]$
$L_S$	Délka dráhy pohybu šneku	$[mm]$
$m_s$	Hmotnost jednoho plastového dílce	$[g]$
$M_S$	Strojní náklady, sazba za hodinu provozu stroje	$[Kč/hod]$
$N$	Velikost výrobní série	$[ks]$
$n_f$	Násobnost vstřikovací formy	[-]
$N_{mzd}$	Náklady na mzdy dělníka obsluhy	$[Kč]$
$N_{MZD}$	Hodinová hrubá mzda dělníka	$[Kč]$
$N_{OS}$	Odpisy z pořizovacích nákladů stroje po dobu výroby série	$[Kč]$
$N_{OSR}$	Odpisy z pořizovacích nákladů vstřikovacího stroje	$[Kč/rok]$
$N_R$	Obecné, společné náklady, režie a další náklady	$[Kč]$
$n_s$	Počet otáček šneku vstřikovacího stroje při plastikační	$[min^{-1}]$
$N_S$	Náklady na vstřikovací stroj	$[Kč]$
$nt$	Termínovaná násobnost	[-]
$np$	Praktická násobnost	[-]
$p$	Vnější tlak	$[MPa]$
PA	Polyamid	[-]
PA6	Polyamid 6	[-]
PA66	Polyamid 66	[-]
PC	Polykarbonát	[-]
$p_{d1}$	Tlak v první fázi dotlaku	$[MPa]$



$p_{d2}$	Tlak ve druhé fázi dotlaku	[MPa]
PE	Polyetylen	[-]
PET	Polyethylentereftalát	[-]
$p_f$	Minimální plnicí tlak	[bar]
PF	Fenoplast	[-]
$p_i$	Vnitřní tlak	[MPa]
PMMA	Polymethylmetakrylát	[-]
PP	Polypropylen	[-]
PS	Polystyren	[-]
$P_S$	Příkon stroje	[kW]
PUR	Polyuretan	[-]
$p_v$	Vstřikovací tlak	[bar]
PVC	Polyvinylchlorid	[-]
$p_z$	Zbytkový tlak	[MPa]
$Q$	Teplo vnesené taveninou plastu do formy	[kJ/hod]
$Q_C$	Obchodní přírážky (+) nebo srážky (-) z ceny	[%]
$Q_{ch}$	Teplo odebírané při chlazení	[J·m <sup>2</sup> ]
$Q_{tav}$	Teplo dodané tavenině	[J]
$s$	Tloušťka plastového dílce/ mezery ve tvarové dutině	[mm]
$S$	Výpočet vlastních nákladů na jeden plastový dílec	[Kč/ks]
$t_d$	Doba dotlaku	[s]
$t_D$	Doba splnění dodávky	[dnů]
$t_{d1}$	Doba první fáze dotlaku	[s]
$t_{d21}$	Doba první části druhé fáze dotlaku	[s]
$t_{d22}$	Doba druhé části druhé fáze dotlaku	[s]
$T_e$	Teplota plastového dílce při odformování	[°C]
$T_f$	Teplota viskózního toku	[°C]
$T_f$	Teplota vytemperované vstřikovací formy	[°C]
$t_F$	Doba výroby vstřikovací formy	[hod]
$T_F$	Doba výroby formy s násobností 1	[hod]
$T_g$	Teplota skelného přechodu	[°C]
$t_{ch}$	Doba chlazení	[s]
$t_K$	Doba potřebná pro konstrukci vstřikovací formy	[dnů]
$T_m$	Teplota taveniny polymeru	[°C]
$T_P$	Doba výroby, zhotovení celé série plastových dílců	[hod]
$t_{pl}$	Doba plastikace	[s]
$T_S$	Strojní čas, doba chodu stroje	[hod]
$t_{s1}$	Doba uzavírání nástroje	[s]
$t_{s2}$	Doba po uzavření nástroje a před počátkem plnění	[s]
$t_{s3}$	Doba otevírání nástroje	[s]
$t_v$	Doba plnění tvarové dutiny formy	[s]
$T_{žS}$	Předpokládaná doba životnosti stroje	[rok]
$V_D$	Velikost vstřikovaného objemu taveniny	[cm <sup>3</sup> ]
$v_v$	Vstřikovací rychlost	[cm <sup>3</sup> /s]
$W_F$	Náklady na vstřikovací formu	[Kč]
$W_{HVS}$	Cena horké vtokové soustavy	[Kč]
$W_{ZF}$	Cena výroby desek, ostatních součástí formy a normálií	[Kč]
$Z_C$	Výrobní zisk	[%]
X	Krystalinita	[-]
$\Delta h$	Rozdíl entalpií plastu mezi teplotami $T_m$ a $T_e$	[kJ/kg]

$\varepsilon_1$	Elastická časově nezávislá deformace	[-]
$\varepsilon_2$	Elastická časově závislá deformace	[-]
$\varepsilon_3$	Plastická deformace	[-]
$\rho$	Hustota	$[g/cm^3]$
$\eta$	Dynamická viskozita taveniny polymeru	$[Pa \cdot s]$
$\sigma_b$	Napětí při přetržení	[MPa]
$\sigma_m$	Maximální napětí v tahu	[MPa]
$\sigma_N$	Mez únavy	[MPa]

## SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 1 Příklady produktů technologie vstřikování plastů
- Obr.2 3D model zadaného tělesa stínítka lampičky
- Obr. 3 3D Model Polyisobutylenu
- Obr.4 Znázornění průběhu polymerace
- Obr. 5 Schematické znázornění rozdílu mezi polyreakcemi
- Obr. 6 Princip uspořádání struktury polymerů
- Obr. 7 Rozdělení molekulární struktury
- Obr. 8 Amorfní a krystalické oblasti
- Obr. 9 Znázornění lamely
- Obr. 10 Sférolitická struktura
- Obr. 11 Struktura typu Shish-kebab
- Obr.12 Přejímové teploty polymerů
- Obr. 13 Přejímové oblasti polymerů
- Obr. 14 Závislost modulu pružnosti polymerů na teplotě
- Obr. 15 Všeobecné rozdělení plastů
- Obr. 16 Průběh tahové zkoušky plastů
- Obr. 17 Srovnání pevnosti polymerů
- Obr. 18 Tvrdoměr . schéma a indentory
- Obr. 19 Stádia deformace při krípu plastu
- Obr. 20 Wohlerovy křivky
- Obr. 21 Hysterezní smyčka napětí v plastu
- Obr. 22 Vliv navlhavosti
- Obr.23 Příklad halogenového analyzátoru
- Obr.24 Srovnání elektrických vlastností plastového materiálu a stříbra
- Obr.25 Ashbyho mapa materiálů
- Obr.26 Schématické znázornění viskoelastivity plastu
- Obr.27 Křivky viskozity
- Obr.28 Oblasti viskózního chování plastů
- Obr. 29 Schématické znázornění vstřikovací jednotky
- Obr. 30 Schématické znázornění průběhu přípravného zpracování plastů
- Obr. 31 Nástroje pro granulaci ze strun
- Obr. 32 Obvyklé značení recyklovatelných plastů
- Obr. 33 Časový diagram průběhu tlaku během vstřikovacím cyklu
- Obr.34 Teplota taveniny při vstřikování
- Obr. 35 Vliv času přepnutí dotlaku na tlak ve formě
- Obr. 36 Dávka plastu pro vstřikovací cyklus
- Obr. 37 Procesní technologické okno
- Obr. 38 Vliv vstřikovací rychlosti na tlak ve formě
- Obr. 39 Vliv doby dotlaku na vnitřní tlak ve formě

- Obr. 40 Vliv parametrů vstřikování na orientaci
- Obr. 41 Různé stupně krystalinity pozorované mikroskopem
- Obr. 42 Využití fotoelasticimetrie při stanovení pnutí
- Obr. 43 Časový průběh vzniku smršťení plastu
- Obr. 44 Vliv parametrů vstřikování na smršťení
- Obr. 45 Průběh teploty ve válci při vstřikování reaktoplastů
- Obr. 46 Princip vícekomponentního vstřikování
- Obr. 47 Řez vstřikovací formou
- Obr. 48 Princip elektroerozivního hloubení forem
- Obr. 49 Základní druhy geometrického uspořádání rozváděcích kanálků
- Obr. 50 Základní druhy konstrukčního řešení studených vtoků
- Obr. 51 Schéma horkého vtoku
- Obr. 52 Řez izolovaným horkým vtokem
- Obr. 53 Externě vyhřívaná horká tryska
- Obr. 54 Ilustrace zanechaných stop po horkém vtoku
- Obr. 55 Princip odvodu tepla z formy
- Obr. 56 Schéma temperačního systému formy
- Obr. 57 Vliv umístění temperačních kanálků na kolísání teploty formy
- Obr. 58 Schematický řez formou zaměřený na kolíkový vyhazovací systém
- Obr. 59 Řez odvzdušňovací drážkou formy
- Obr. 60 Popis stroje pro vstřikování plastů
- Obr. 61 Schematický řez vstřikovací jednotkou
- Obr. 62 Příklad uzavírací jednotky stroje
- Obr. 63 Rekapitulace geometrie tělesa plastového stínítka lampičky
- Obr. 64 Odhad délky dráhy toku taveniny pomocí Inventoru
- Obr. 65 Grafické znázornění jednotlivých částí doby vstřikovacího cyklu
- Obr. 66 Volba polohy dělicí roviny formy
- Obr. 67 Umístění vtoku na reálném stínítku a predikce polohy vtoku Inventoru
- Obr. 68 Predikce doby plnění součásti v Inventoru
- Obr. 69 Predikce spolehlivosti vyplnění tělesa v Inventoru
- Obr. 70 Predikce kvality vstřikování stínítka v Inventoru
- Obr. 71 Katalogové rozměry horkých trysek Synventive
- Obr. 72 Druhá část volby rozměrů horké trysky dle katalogu Synventive
- Obr. 73 Základní návrh desek formy
- Obr. 74 Zařízení pro vytáčení závitů firmy STRACK Z5420
- Obr. 75 Reprezentativní 3D model nástroje pro vytáčení závitu
- Obr. 76 Schematický náčrt zaformování stínítka
- Obr. 78 Pohled na temperační systém formy
- Obr. 79 Finální pohledy na vstřikovací formu
- Obr. 80 Schematické znázornění klíčových rozměrů stroje Allrounder 520S

## SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Doba sušení a vliv vlhkosti na vybrané plastové materiály

Tab.2 Vzbrané vlastnosti Lexanu 925

Tab.3 Doporučené hodnoty průměru šneku

Tab. 4 Ověření správnosti volby stroje Allrounder 520S

Tab.5 Technologické parametry pro vstřikování

## SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 .....Materiálový list Lexanu 925[32]

Příloha 2 .....Grafy vybraných vlastností Lexanu 925 [42]

Příloha 3 .....Katalog firmy Strack (nástroje na vytáčení závitů) [32]

## Seznam výkresové dokumentace

**1-1/3-CAJAN-DP Výkres sestavy formy včetně kusovníku**

**2-2/3-CAJAN-DP výkres vložky tvárníku**

**3-3/3-CAJAN-DP výkres stínítka**



## Příloha 1


**LEXAN™ Resin 925**  
**Americas: COMMERCIAL**

LEXAN 925 Polycarbonate (PC) resin is a non-filled, injection moldable grade. This non-chlorinated, non-brominated flame retardant PC has a UL V0 rating. LEXAN resin 925 is available in various opaque color options and is a general-purpose resin that is an excellent candidate for a wide variety of applications.

TYPICAL PROPERTIES <sup>1</sup>	TYPICAL VALUE	Unit	Standard
<b>MECHANICAL</b>			
Tensile Stress, yld, Type I, 50 mm/min	630	kgf/cm <sup>2</sup>	ASTM D 638
Tensile Stress, brk, Type I, 50 mm/min	860	kgf/cm <sup>2</sup>	ASTM D 638
Tensile Strain, yld, Type I, 50 mm/min	6	%	ASTM D 638
Tensile Strain, brk, Type I, 50 mm/min	125	%	ASTM D 638
Tensile Modulus, 50 mm/min	23100	kgf/cm <sup>2</sup>	ASTM D 638
Flexural Stress, yld, 1.3 mm/min, 50 mm span	1020	kgf/cm <sup>2</sup>	ASTM D 790
Flexural Modulus, 1.3 mm/min, 50 mm span	23800	kgf/cm <sup>2</sup>	ASTM D 790
<b>IMPACT</b>			
Izod Impact, notched, 23°C	81	cm-kgf/cm	ASTM D 256
Instrumented Impact Total Energy, 23°C	744	cm-kgf	ASTM D 3763
<b>THERMAL</b>			
Vicat Softening Temp, Rate B/50	143	°C	ASTM D 1525
HDT, 0.45 MPa, 3.2 mm, unannealed	137	°C	ASTM D 648
HDT, 1.82 MPa, 3.2mm, unannealed	126	°C	ASTM D 648
CTE, -40°C to 40°C, flow	6.66E-05	1/°C	ASTM E 831
CTE, -40°C to 40°C, xflow	6.66E-05	1/°C	ASTM E 831
Relative Temp Index, Elec	130	°C	UL 746B
Relative Temp Index, Mech w/impact	120	°C	UL 746B
Relative Temp Index, Mech w/o impact	130	°C	UL 746B
<b>PHYSICAL</b>			
Specific Gravity	1.19	-	ASTM D 792
Mold Shrinkage, flow, 3.2 mm (5)	0.6 - 0.8	%	SABIC Method
Melt Flow Rate, 300°C/1.2 kgf	14	g/10 min	ASTM D 1238
<b>ELECTRICAL</b>			
Arc Resistance, Tungsten (PLC)	7	PLC Code	ASTM D 495

(1) Typical values only. Variations within normal tolerances are possible for various colors. All values are measured after at least 48 hours storage at 23°C/50% relative humidity. All properties, except the melt volume and melt flow rates, are measured on injection molded samples. All samples tested under ISO test standards are prepared according to ISO 254.

(2) Only typical data for selection purposes. Not to be used for part or tool design.

(3) This rating is not intended to reflect hazards presented by this or any other material under actual fire conditions.

(4) Internal measurements according to UL standards.

(5) Measurements made from laboratory test coupon. Actual shrinkage may vary outside of range due to differences in processing conditions, equipment, part geometry and tool design. It is recommended that mold shrinkage studies be performed with surrogate or legacy tooling prior to cutting tools for new molded article.

(6) Needs hard coat to consistently pass 60 sec Vertical Burn.

Source: GMD, last updated:

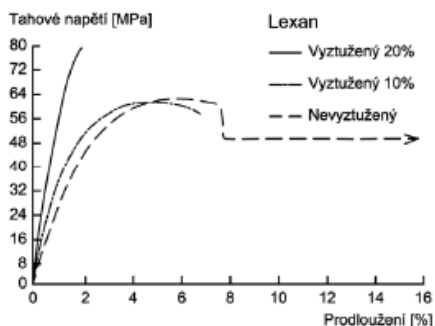
PLEASE CONTACT YOUR LOCAL SALES OFFICE FOR AVAILABILITY IN YOUR AREA.

DISCLAIMER: THE MATERIALS, PRODUCTS AND SERVICES OF SAUDI BASIC INDUSTRIES CORPORATION (SABIC) OR ITS SUBSIDIARIES OR AFFILIATES (SELLER) ARE SOLD SUBJECT TO SELLER'S STANDARD CONDITIONS OF SALE, WHICH ARE AVAILABLE UPON REQUEST. INFORMATION AND RECOMMENDATIONS CONTAINED IN THIS DOCUMENT ARE GIVEN IN GOOD FAITH. HOWEVER, SELLER MAKES NO EXPRESS OR IMPLIED REPRESENTATION, WARRANTY OR GUARANTEE (I) THAT ANY RESULTS DESCRIBED IN THIS DOCUMENT WILL BE OBTAINED UNDER END-USE CONDITIONS, OR (II) AS TO THE EFFECTIVENESS OR SAFETY OF ANY DESIGN OR APPLICATION INCORPORATING SELLER'S MATERIALS, PRODUCTS, SERVICES OR RECOMMENDATIONS. UNLESS OTHERWISE PROVIDED IN SELLER'S STANDARD CONDITIONS OF SALE, SELLER SHALL NOT BE RESPONSIBLE FOR ANY LOSS RESULTING FROM ANY USE OF ITS MATERIALS, PRODUCTS, SERVICES OR RECOMMENDATIONS DESCRIBED IN THIS DOCUMENT. Each user is responsible for making its own determination as to the suitability of Seller's materials, products, services or recommendations for the user's particular use through appropriate end-use and other testing and analysis. Nothing in any document or oral statement shall be deemed to alter or waive any provision of Seller's Standard Conditions of Sale or this Disclaimer, unless it is specifically agreed to in a writing signed by Seller. Statements by Seller concerning a possible use of any material, product, service or design do not, are not intended to, and should not be construed to grant any license under any patent or other intellectual property right of Seller or as a recommendation for the use of any material, product, service or design in a manner that infringes any patent or other intellectual property right.

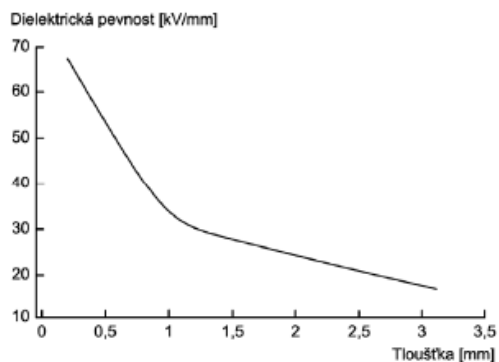
SABIC and brands marked with TM are trademarks of SABIC or its subsidiaries or affiliates.

© 2016 Saudi Basic Industries Corporation (SABIC).

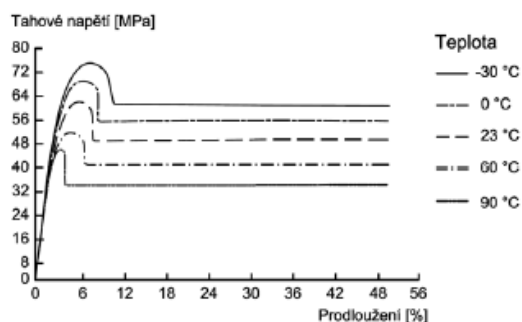
## Příloha 2



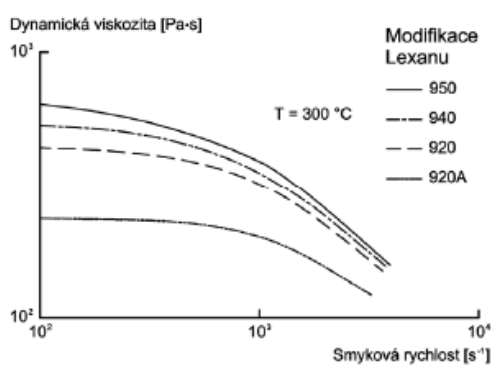
Křivky napětí-deformace pro vyztužený a Lexan



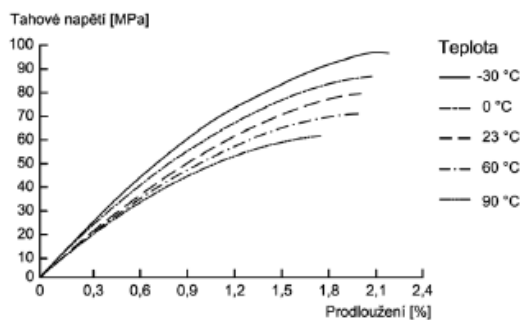
Dielektrická pevnost neplněného Lexanu v závislosti na jeho tloušťce



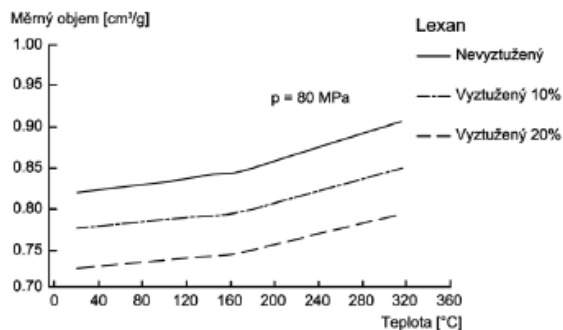
Křivky napětí-deformace nevztuženého Lexanu při různé teplotě



Dynamická viskozita vybraných nehořlavých modifikací Lexanu jako funkce smykové rychlosti



Křivky napětí-deformace 20% vyztuženého Lexanu při různé teplotě



p-v-T diagram vyztuženého a nevztuženého Lexanu

## Příloha 3

## Z 5420-

Zweifach-Ausschraubeinheiten, hydraulisch					Twin unscrewing units, hydraulic					Unités double pour dévisser le filet, hydraulique									
ASL	Type	R/L	P	L	Leistung Power Puissance kW	Drehzahl Speed Vitesse min <sup>-1</sup>	Verdrängung Displacement Déplacement cm <sup>3</sup>	H max.	H1	H2	H3	L1	L2	L3	B1	B2	B3	B4	d1
20	7	R/L	0,5-4	160	2,6	1950	8,2	230	206	123	45	270	240	80	129	70	36	20	10,5
	8			160	3,2	630	31,6	240	206	123	45	270	240	80	129	70	36	20	10,5
	30	1		41-50	2,6	1950	8,2	217	218	112	50	120	100	30	150	105	25	58	10,5
	2			41-50	3,2	630	31,6	227	218	112	50	120	100	30	150	105	25	58	10,5
	3	80	2	8	3,2	1950	8,2	240	226	133	55	190	160	85	70	36	20	10,5	
	4			80	3,2	630	31,6	250	226	133	55	190	160	85	70	36	20	10,5	
	5			120	2,6	1950	8,2	240	226	133	55	230	200	40	82	70	36	20	10,5
	6			120	3,2	630	31,6	250	226	133	55	230	200	40	82	70	36	20	10,5
	7	160	2,6	1950	8,2	240	226	133	55	270	240	80	129	70	36	20	10,5		
	8			160	3,2	630	31,6	250	226	133	55	270	240	80	129	70	36	20	10,5
40	1	41-50	2,6	1950	8,2	237	248	122	60	120	100	30	150	105	25	58	10,5		
	2			41-50	3,2	630	31,6	227	248	122	60	120	100	30	150	105	25	58	10,5
	3	80	2,6	1950	8,2	250	246	143	65	190	160	85	70	36	20	10,5			
	4			80	3,2	630	31,6	260	246	143	65	190	160	85	70	36	20	10,5	
	5	120	2,6	1950	8,2	250	246	143	65	230	200	40	82	70	36	20	10,5		
	6			120	3,2	630	31,6	260	246	143	65	230	200	40	82	70	36	20	10,5
	7	160	2,6	1950	8,2	260	246	143	65	270	240	80	129	70	36	20	10,5		
	8			160	3,2	630	31,6	270	246	143	65	270	240	80	129	70	36	20	10,5
	9			160	3,2	630	31,6	270	246	143	65	270	240	80	129	70	36	20	10,5
	10			160	3,2	630	31,6	270	246	143	65	270	240	80	129	70	36	20	10,5
50	1	41-50	2,6	1950	8,2	237	278	132	70	120	100	30	150	105	25	58	10,5		
	2			41-50	3,2	630	31,6	247	278	132	70	120	100	30	150	105	25	58	10,5
	3	80	2,6	1950	8,2	260	266	153	75	190	160	85	70	36	20	10,5			
	4			80	3,2	630	31,6	270	266	153	75	190	160	85	70	36	20	10,5	
	5	120	2,6	1950	8,2	260	266	153	75	230	200	40	82	70	36	20	10,5		
	6			120	3,2	630	31,6	270	266	153	75	230	200	40	82	70	36	20	10,5
	7	160	2,6	1950	8,2	260	266	153	75	270	240	80	129	70	36	20	10,5		
	8			160	3,2	630	31,6	270	266	153	75	270	240	80	129	70	36	20	10,5
	9			160	3,2	630	31,6	270	266	153	75	270	240	80	129	70	36	20	10,5
	10			160	3,2	630	31,6	270	266	153	75	270	240	80	129	70	36	20	10,5
60	1	41-50	2,6	1950	8,2	247	308	142	80	120	100	30	150	105	25	58	10,5		
	2			41-50	3,2	630	31,6	257	308	142	80	120	100	30	150	105	25	58	10,5
	3	80	2,6	1950	8,2	270	286	163	85	190	160	85	70	36	20	10,5			
	4			80	3,2	630	31,6	280	286	163	85	190	160	85	70	36	20	10,5	
	5	120	2,6	1950	8,2	270	286	163	85	230	200	40	82	70	36	20	10,5		
	6			120	3,2	630	31,6	280	286	163	85	230	200	40	82	70	36	20	10,5
	7	160	2,6	1950	8,2	270	286	163	85	270	240	80	129	70	36	20	10,5		
	8			160	3,2	630	31,6	280	286	163	85	270	240	80	129	70	36	20	10,5
	9			160	3,2	630	31,6	280	286	163	85	270	240	80	129	70	36	20	10,5
	10			160	3,2	630	31,6	280	286	163	85	270	240	80	129	70	36	20	10,5
70	1	41-50	2,6	1950	8,2	260	326	183	105	190	160	85	70	36	20	10,5			
	2			41-50	3,2	630	31,6	270	306	173	95	190	160	85	70	36	20	10,5	
	3	80	2,6	1950	8,2	280	306	173	95	230	200	40	82	70	36	20	10,5		
	4			80	3,2	630	31,6	280	306	173	95	230	200	40	82	70	36	20	10,5
	5	120	2,6	1950	8,2	280	306	173	95	230	200	40	82	70	36	20	10,5		
	6			120	3,2	630	31,6	290	306	173	95	270	240	80	129	70	36	20	10,5
	7	160	2,6	1950	8,2	280	306	173	95	270	240	80	129	70	36	20	10,5		
	8			160	3,2	630	31,6	290	306	173	95	270	240	80	129	70	36	20	10,5
	9			160	3,2	630	31,6	290	306	173	95	270	240	80	129	70	36	20	10,5
	10			160	3,2	630	31,6	290	306	173	95	270	240	80	129	70	36	20	10,5
80	1	41-50	2,6	1950	8,2	300	326	183	105	190	160	85	70	36	20	10,5			
	2			41-50	3,2	630	31,6	300	326	183	105	190	160	85	70	36	20	10,5	
	3	80	2,6	1950	8,2	300	326	183	105	190	160	85	70	36	20	10,5			
	4			80	3,2	630	31,6	300	326	183	105	190	160	85	70	36	20	10,5	
	5	120	2,6	1950	8,2	300	326	183	105	190	160	85	70	36	20	10,5			
	6			120	3,2	630	31,6	300	326	183	105	190	160	85	70	36	20	10,5	
	7	160	2,6	1950	8,2	300	326	183	105	190	160	85	70	36	20	10,5			
	8			160	3,2	630	31,6	300	326	183	105	190	160	85	70	36	20	10,5	
	9			160	3,2	630	31,6	300	326	183	105	190	160	85	70	36	20	10,5	
	10			160	3,2	630	31,6	300	326	183	105	190	160	85	70	36	20	10,5	